

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIOENGINEERING

SOLÁRNÍ NABÍJEČKA S BALANČNÍM OBVODEM PRO 4 ČLÁNKOVOU BATERII PRACUJÍCÍ V IOT

SOLAR CHARGER WITH BALANCING CIRCUIT FOR 4 CELL BATTERY PACK WORKING IN AN IOT
NETWORK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Šlígľ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Erik Herceg

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Jan Šlígľ

ID: 203352

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Solární nabíječka s balančním obvodem pro 4 článkovou baterii pracující v IoT

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte technologii bezdrátového přenosu dat pomocí sítí IoT (LoRa, Sigfox, NB-IoT). S pomocí vývojového kitu na platformě STM32 ověřte správnou funkčnost posílání dat. Zvolte vhodný modul pro připojení zařízení do sítě IoT s důrazem na nízkou vlastní spotřebu energie. Navrhněte obvodové schéma zařízení, jehož součástí budou: DC/DC měnič s vhodným výstupním napětím pro různé typy baterií, management baterky s měřením stavu baterií, napětí a odebíraným proudem a bezdrátový modul pro posílání těchto dat. Navrhněte desku plošných spojů.

Simulujte a porovnejte jednotlivé typy balančních obvodů a popište jejich vlastnosti. Navrhněte vývojové diagramy důležitých funkcí. S využitím vývojového kitu implementujte firmware zařízení tak, aby bylo schopné bezdrátově odesílat následující data: stav a napětí baterie, napětí na člancích, odebíraný proud a teplotu baterií. Implementujte a otestujte balanční algoritmus do vývojového kitu STM32.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HANES, D. IOT fundamentals: networking technologies, protocols, and use cases for the internet of things. 3rd edition. Indianapolis, IN: Cisco Press, 2017. ISBN 978-1-58714-456-1.

[2] FRADEN, J. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. 4th ed. New York: Springer, c2010. ISBN 978-1-4419-6465-6.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 4.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Erik Herceg

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem obvodu pro řízení nabíjení čtyř akumulátorových článků pomocí solární energie. Na jednotlivých člancích je aplikováno pasivní balancování. Je měřeno napětí článků, které by následně mělo být odesláno pomocí sítě LoRa. Návrh bere v potaz především nízkou spotřebu energie, kompaktnost a nezávislost. Správná funkce je poté ověřena pomocí simulací v prostředí MATLAB Simulink a následně otestována také na vývojovém kitu STM32. Výsledkem bude deska plošných spojů a simulace důležitých částí zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Solární nabíječ, balancer, STM32, baterie, simulace, IoT

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the design of a circuit for charging control of the four battery cells using solar energy. Passive balancing is applied to the separate cells. The measured cell voltage should then be sent via the LoRa network. The proposal mainly considers low energy consumption, compactness and independence. The appropriate function is then verified using MATLAB Simulink simulations and subsequently tested on the STM32 development kit. The result will be a finished printed circuit board design and simulation of important parts of the device.

KEYWORDS

Solar charger, balancer, STM32, battery, simulation, IoT

ŠLÍGL, Jan. *Solární nabíječka s balančním obvodem pro 4 článkovou baterii pracující v IoT*. Brno, 2020, 73 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Erik Herceg

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Solární nabíječka s balančním obvodem pro 4 článkovou baterii pracující v IoT“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Eriku Hercegovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	10
1 Fotovoltaické články	11
1.1 Princip funkce	11
1.2 Druhy článků	11
1.2.1 Monokrystalické	12
1.2.2 Polykrystalické	12
1.3 Princip MPPT	12
2 Baterie	13
2.1 Rozdělení podle principu	13
2.1.1 Primární články	13
2.1.2 Sekundární články	13
2.1.3 Palivové články	14
2.2 Akumulátory	14
2.2.1 Olověné	14
2.2.2 NiCd - Nikl kadmiové	14
2.2.3 NiMH - Nikl metal hybridové	15
2.3 Lithiové akumulátory	15
2.3.1 Li-Ion	15
2.3.2 Li-Pol	16
2.3.3 LiFePO ₄	16
2.3.4 Srovnání akumulátorů	17
3 Balancování	20
3.1 Rozdíly aktivního a pasivního balancování	21
3.2 Pasivní balancování	22
3.3 Aktivní balancování	22
4 IoT	25
4.1 LPWAN - LoRa	25
5 Výběr periférií	28
5.1 Fotovoltaický panel	29
5.2 Akumulátory	29
5.3 Řídící obvod nabíjení akumulátorů (Solar charger)	32
5.4 DC/DC měnič typu step-down	33
5.5 Regulátor napětí s nízkým úbytkem (LDO)	33

5.6	Mikrokontrolér - STM32	33
5.7	Měřicí obvody	34
5.7.1	Měření napětí	34
5.7.2	Měření proudu	38
5.8	Multiplexor	39
5.9	LoRa	39
6	Návrh zařízení	40
6.1	Solar charger	40
6.1.1	Vypínač nabíjení	41
6.2	Step-down měnič	42
6.3	LDO	43
6.4	Pasivní balanční obvod	43
6.5	Obvod měření napětí	45
6.6	Pomocné obvody MCU	45
6.7	Doplňkové obvody LoRa	46
7	Návrh desky	47
7.1	Rozdělení zemí	47
8	Výsledky	48
8.1	Algoritmus pasivního balancování	48
8.2	Simulace	50
	Závěr	54
	Literatura	55
	Seznam příloh	58
A	Schéma zapojení	59
B	Motivy desek plošného spoje	63
C	Seznam součástek	65
D	Zapojení simulačních obvodů	67
E	Zdrojový kód	69

Seznam obrázků

1.1	Příklad sledování MPPT	12
2.1	Funkce Li-Ion článku	16
2.2	Srovnání akumulátorů	17
3.1	Pasivní balancování	22
3.2	Přístupy aktivního balancování	23
3.3	Obvody aktivního balancování	24
4.1	Spektrogram fyzické vrstvy LoRa	26
4.2	Architektura sítě LoRaWAN	27
5.1	Blokové schéma zařízení	28
5.2	Vybíjecí charakteristiky vybraného akumulátoru	32
5.3	Původní návrh obvodu pro měření napětí	35
5.4	Simulace původního obvodu pro měření napětí	36
5.5	Simulace předělaného obvodu pro měření napětí	37
5.6	Integrovaný obvod INA181	38
6.1	Integrovaný obvod BQ24650	40
6.2	Integrovaný obvod LM9061	41
6.3	Integrovaný obvod LM2596 5.0	42
6.4	Návrh obvodu pro pasivní balancování	43
6.5	Charakteristika filtru před SMA konektorem	46
7.1	Rozdělení zemí na MCU	47
8.1	Algoritmus pro pasivní balancování	48
8.2	Zapojení simulačního obvodu	50
8.3	Napětí na bateriích při pasivním balancování	52
8.4	SOC na bateriích při pasivním balancování	52
8.5	Napětí baterií aktivního balancování (nabíjení)	53
8.6	Napětí baterií aktivního balancování (vyrovnání napětí)	53
A.1	Solar charger, zdroje napětí, měření proudu	59
A.2	Balanční obvody, spínač	60
A.3	Mikrokontrolér, multiplexor, LoRa	61
A.4	Měřicí obvody	62
B.1	Motiv desky - horní strana	63
B.2	Motiv desky - spodní strana	63
B.3	Osazení desky - horní strana	64
B.4	Osazení desky - spodní strana	64
D.1	Obvod pro simulaci pasivního balancování	67
D.2	Obvod pro simulaci aktivního balancování	68

Seznam tabulek

2.1	Vlastnosti Li-Ion akumulátorů	18
2.2	Vlastnosti LiFePO ₄ akumulátorů	19
5.1	Charakteristika vybraného fotovoltaického panelu.	30
5.2	Charakteristika vybraného akumulátoru.	31

Úvod

V moderním světě, ve kterém žijeme, se běžně setkáváme s velkým počtem elektronických zařízení usnadňujících a zpříjemňujících náš každodenní život. Především pak telefony, notebooky, senzory a další. Většina těchto zařízení je bateriově napájena a protože není praktické mít neustále při sobě náhradní baterie, tak přirozeně vznikají požadavky na to, jak baterie nabíjet.

I přes obrovské pokrytí našeho světa rozvodnou sítí elektřiny, je stále spousta míst, která pokrytá nejsou a nejspíš nikdy nebudou. V tuto chvíli je nezbytné užití alternativních zdrojů na dobíjení našich zařízení. V ideálním případě pak stojíme o co největší samostatnost zařízení bez nutnosti neustálé kontroly, proto existuje "The Internet of Things" neboli "Internet věcí". Jedná se o síť, v které spolu zařízení komunikují sama, sbírají od sebe data a tím co nejvíce vylučují interakci mezi člověkem a zařízením.

Předmětem této práce je provést návrh přenosné bateriové stanice o čtyřech článcích, která se bude dobíjet pomocí fotovoltaického panelu. Zařízení bude následně schopno dobíjet naši přenosnou elektroniku v místech bez rozvodné elektrické sítě.

Bude kladen důraz na velikost zařízení, ochranu článků a možnost sledování stavu nabíječky. Toto vše bude dosaženo na základě mikrokontroléru STM32, který se bude starat o balancování čtyř akumulátorů, měření a zpracování dat. Tato data budou k dispozici pro odeslání pomocí tohoto zařízení do IoT, konkrétně pomocí sítě LoRa.

Výběr i návrh jednotlivých periférií je řádně odůvodněn, přičemž je přihlíženo na již výše zmíněné požadavky.

Následně jsou také provedeny simulace pro principiální vysvětlení aktivního a pasivního balancování. A také je algoritmus implementován do vývojového kitu STM32, kde je i za pomoci periférií ověřeno správné fungování pasivního balancování.

1 Fotovoltaické články

1.1 Princip funkce

Základ fotovoltaického článku vychází z obyčejné polovodičové diody. Je tedy založen na spojení dvou různě obohacených polovodičů, nejčastěji křemíku, a to typu P nebo N, a tím vytvoření P-N přechodu. Polovodič typu N se vyznačuje tím, že atomy příměsí v krystalu křemíků mají větší počet valenčních elektronů než atomy křemíku. Polovodič typu P má počet těchto elektronů naopak menší. Pokud se takto obohacené polovodiče spojí vzniká přechod P-N, což je vyvážená hranice obou materiálů. Pokud je tento přechod vyveden co nejbližší povrchu materiálu a poté vystaven elektromagnetickému záření (v našem případě produkované Sluncem), začne docházet k narážení fotonů na přechod P-N. Fotony budou vyřazet elektrony z krystalové mřížky a vytváří se nerovnovážný stav, elektrony začnou putovat k opačným elektrodám a vytvoří tím elektrické napětí, které je pro křemík přibližně 0,5 V. Jedná se o vnitřní fotoelektrický jev. Připojením zátěže pak začne docházet k vyrovnávání kladného a záporného náboje a tím také procházení proudu.

Tento jednoduchý princip se poté aplikuje ve velkém měřítku a spojováním těchto triviálních článků získáváme větší napětí. Články se pak podle požadovaného napětí a proudu, který chceme odebírat, spojí v jednotlivé moduly (panely). Panely pak mohou vytvářet pole, která jsou instalována na budovy apod. Životnosti zapouzdřených článků jsou udávány producenty v rozmezí 20 - 30 let. Účinnost přeměny sluneční energie na elektrickou jsou teoreticky až 35 %, reálně však nejnovější technologie dosahuje na 25 %.

1.2 Druhy článků

Ačkoliv se fotovoltaické články stále zlepšují, tak v porovnání s přeměnou fosilních paliv na elektrickou energii, stále vycházejí mnohem hůře. Proto jde zde spíše o to jaká je cena za 1 W (Watt) elektrické energie (angl. Cost Per Watt - CPW). Tento parametr udává účinnost použitého článku. Je důležité, aby byl systém levný a zároveň efektivní, avšak tyto parametry jsou na sobě často závislé, například článek s vysokou účinností bude znamenat vysokou cenu výroby a tím nemusí nezbytně vést ke snížení CPW. Proto je třeba mít toto na paměti a vždy volit články vzhledem k tomu, na co budou užívány a vytvořit kompromis mezi cenou a účinností.

1.2.1 Monokrystalické

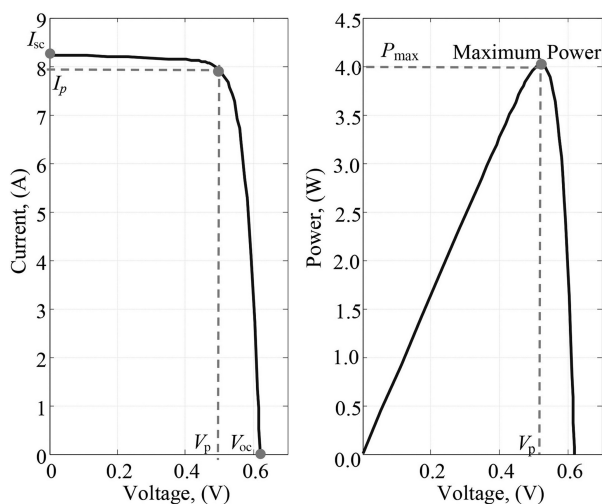
Jak již název napovídá vyrábí se z jednoho krystalu křemíku, přesněji jeho zárodku a to tažením. Poté, co je vytažen dostatečně velký ingot, je článek vytvořen postupným rozřezáním. P-N přechod se vytvoří přidávkou fosforu. Tato metoda je relativně náročná na provedení, zároveň vzniká spousta odpadu a tudíž je tato metoda drahá. Reálná účinnost článků se pohybuje mezi 14 - 18 %.

1.2.2 Polykrystalické

Nejběžnější typ současných článků. Jde o rychlejší a levnější metodu, kdy se články vyrábí odléváním čistého křemíku, jelikož odlévání je relativně jednodušší metoda než tažení. Články mají o něco horší elektrické vlastnosti (nižší účinnost i proud), protože struktura krystalů je z větší části náhodná a tudíž neideální. Toto je však dosaženo za mnohem nižší cenu a menší plýtvání materiálem.

1.3 Princip MPPT

MPPT neboli Maximum Power Point Tracking se nazývá systém pro sledování maximálního (účinného) napětí, které je fotovoltaický modul schopen produkovat. Typicky dosahuje fotovoltaický modul zhruba 17 V (Volt) při teplotách okolo 25°C, ale tato hodnota může spadnout v horkém dni nebo se naopak zvýšit za chladného dne. Základním principem MPPT je dostat maximální možný výkon z fotovoltaického modulu a to tak, že ho budeme provozovat při nejúčinnějším možném napětí.



Obr. 1.1: Příklad závislosti proudu a výkonu na napětí článku, umístění MPP (Maximum Power Point) [2].

2 Baterie

Vzhledem k tomu, že práce se věnuje nabíjení akumulátoru pomocí solárního článku, bude tato kapitola věnována tomu, jaké jsou možnosti výběru. Představeny zde budou jednotlivé technologie, rozdělení a případné výhody a nevýhody jednotlivých možností.

Nejhlavnějšími parametry, které nás při výběru baterií nebo akumulátorů zajímají, jsou kapacita, jmenovité napětí, nabíjecí a vybíjecí proud, vnitřní odpor a provozní vlastnosti (počet cyklů, teplota, atd.).

Kapacita určuje, jak velký elektrický náboj je teoreticky akumulátor schopen uchovat. Typicky se udává v Ah (Ampérhodinách) nebo mAh (mili-Ampérhodinách). Jmenovité napětí je buď udáváno na celý akumulátor (baterie) nebo na jednotlivé články. Tato hodnota se liší podle technologie výroby. Nabíjecí a vybíjecí proud je udáván ve většině případu v A (Ampér). Pro správné zacházení s akumulátorem by neměly být tyto hodnoty překročeny. Značí se 1C tzn., že velikost odpovídá číselně kapacitě akumulátoru (např. při akumulátoru 2100 mAh je $1C = 2,1 \text{ A}$). Vnitřní odpor určuje, k jak velkému poklesu napětí dojde, pokud přestaneme provozovat akumulátor naprázdno a připojíme k němu zátěž. Čím je tato hodnota nižší, tím je teoreticky akumulátor nebo baterie lepší. Při odebírání proudu je třeba tento odpor "překonat". Čím větší proud je odebírán, tím více bude klesat napětí na výstupních svorkách. A v poslední řadě, co od akumulátorů očekávat. Kolik nabíjecích a vybíjecích cyklů lze provést a při jakých hodnotách proudu, při jakých teplotách je nejlepší je provozovat.

Na základě těchto parametrů je třeba si zvolit ideální akumulátor dle našich požadavků.

2.1 Rozdělení podle principu

2.1.1 Primární články

Ve zkratce jde v podstatě o elektrochemické zdroje, které jsou na jedno použití. Po přeměně reaktančních členů v článku na produkty, již nelze proces zvrátit. Hovorovým výrazem jsou nazývány baterie.

2.1.2 Sekundární články

Liší se od primárních článků tím, že při vybití lze články opět nabít elektrickým proudem. Vzhledem k tomu, že elektrická energie uvnitř těchto článků je akumulována ve formě energie chemické, nazýváme tyto články akumulátory. Běžné napětí

těchto článku je přibližně v rozsahu 1,2 - 2 V, což není vysoké napětí. Proto dochází ke spojování článků a tím se vytváří akumulátorové baterie. Podle technologie výroby se dělí na dvě hlavní skupiny a to olověné a alkalické.

2.1.3 Palivové články

V těchto člancích dochází k přeměně paliva a okysličovadla na elektrickou energii. Přičemž palivo je přiváděno na anodu (kladná elektroda) a okysličovadlo na katodu (zápornou elektrodu). Tyto dva procesy musí být prováděny zároveň a nepřetržitě.

2.2 Akumulátory

2.2.1 Olověné

Jedná se o nejpoužívanější typ akumulátoru vzhledem k jeho užití u osobních automobilů. Princip funkce je takový, že ve zředěné kyselině sírové jsou ponořeny dvě olověné desky (elektrody), to vytvoří jeden článek. Při nabíjení článku vzniká kyselina sírová a houstne elektrolyt uvnitř. Při vybíjení je proces opačný, kdy dochází k řednutí elektrolytu a vytváření elektrického proudu.

Výhody olověných akumulátorů:

- Nízká cena
- Dodávání velkých rázových proudů (pouze krátkodobě)
- Pomalé samovybíjení (3 - 20% / měsíc)

Nevýhody:

- Velmi nepříznivý poměr množství uložené energie ku hmotnosti
- Pomalé nabíjení
- Obsah toxických látek (Pb, H₂SO₄)

2.2.2 NiCd - Nikl kadmiové

Obvyklé napětí těchto článku je přibližně 1,2 V. Jsou vysoce spolehlivé, mohou z nich být odebírány velké proudy, lze je velmi rychle nabíjet a jsou i teplotně odolné. Naopak trpí pamětovým efektem, vyskytuje se u nich náhlý pokles napětí při vybíjení a především obsahují toxické kadmium. Pro tyto vlastnosti se užívají například pro napájení profesionálního akumulátorového nářadí. Obecně slouží pro náročnější aplikace ve zdravotnictví, letecké technice, vojenské technice atp. Avšak nejsou komerčně dostupné a to z důvodu nebezpečí úniku kadmia, to je jak toxické, tak klasifikováno jako látka škodlivá životnímu prostředí.

2.2.3 NiMH - Nikl metal hybridové

Jsou velmi podobné NiCd akumulátorům s kterými mají společnou stejnou kladnou elektrodu. Ve srovnání s nimi mají však přibližně dvojnásobnou kapacitu. Běžně jsou známy především jako AA, AAA atp.

Mají větší kapacitu než NiCd a to při stejných rozměrech, neobsahují toxické kadmium a také netrpí paměťovým efektem. Avšak vyskytuje se u nich větší samovybíjení.

2.3 Lithiové akumulátory

2.3.1 Li-Ion

U těchto akumulátorů je katoda tvořena oxidem kovu (např. LiCoO_2), anoda je pak tvořena z uhlíku a elektrolyt je tvořen lithnou solí rozpuštěnou v organickém karbonátu. Celý proces nabíjení probíhá následujícím způsobem. Během nabíjení jsou tyto elektrody spojeny ve vnějším obvodu (přes zdroj jejich nabíjení). Elektrony jsou nuceny opustit katodu a přesouvají se na anodu vnějším obvodem. Zároveň s tím se ionty lithia pohybují stejným směrem, ale uvnitř akumulátoru skrz elektrolyt. Tímto způsobem je vlastně vnější elektrická energie uložena ve formě chemické energie v anodě a katodě, které se budou lišit svými potenciály. Mají velkou hustotu energie i účinnost se jmenovitým napětím 3,6 V.

Životnost a cykly nabíjení akumulátorů jsou ovlivněny hloubkou vybití/vybíjení, stavem nabití/nabíjením a teplotou, při které jsou používány. Například při nízkých teplotách nabíjení může vznikat na povrchu grafitové anody lithiový dendrit, který postupně pokrývá anodu a zhoršuje všechny vlastnosti. Z těchto důvodů je nutné na akumulátory aplikovat tzv. BMS (Battery Management System neboli systém správy baterií), který se stará o správné nabíjení, vybíjení a udržování akumulátoru.

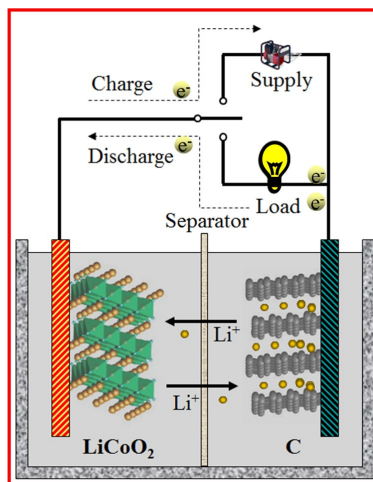
Výhody Li-Ion akumulátorů:

- Netrpí paměťovým efektem
- Velikost (používány jsou především pro přenosné zařízení jako telefony, notebooky atd.)
- Velmi pomalé samovybíjení, avšak i tak mnohem znatelnější oproti Li-Pol
- Skvělý poměr množství uložené energie ku velikosti

Nevýhody:

- Stárnutí (reaktivita lithia je vysoká, článek se rozkládá sám od sebe a i při krátkém nabíjení se to počítá jako nabíjecí cyklus)
- Při vyšších teplotách funguje hůře

- Nutnost přesného řízení nabíjení
- Vyšší cena



Obr. 2.1: Ilustrace funkce Li-Ion článku [4].

2.3.2 Li-Pol

Jeden z modernějších zdrojů elektrické energie, který byl vyvinut na základě Li-Ion akumulátorů. Zásadní rozdíl od Li-Ion baterií je v tom, že Li-Pol baterie obsahují pevný elektrolyt mezi anodou a katodou. Jinak platí stejná pravidla pro zacházení jako u Li-Ion vzhledem k citlivosti článků na přebití nebo podbití.

Výhody Li-Pol akumulátorů:

- Váha
- Velmi pomalé samovybíjení (0,1% / měsíc)
- Velmi malé rozměry (užití pro telefony, fotoaparáty, notebooky atd.)
- Cena

Nevýhody:

- Relativně malý počet dobíjecích cyklů a také stárnutí akumulátoru

2.3.3 LiFePO₄

Dalším posunem v Li-Ion akumulátorech jsou LiFePO₄ akumulátory. Toto chemické složení článků nabízí dobré elektrochemické vlastnosti s malým odporem, předně díky přidanému fosfátu do materiálu katody.

Je snaha užívat tyto akumulátory jako náhrady olověných akumulátorů pro elektromobily, čtyři články vyprodukují 12,8 V, což je podobné napětí jako vytvoří šest

olověných článků (2 V na článek). Při jízdě nabíjejí vozidla kyselinu v olověných bateriích na 14,4 V (přibližně) a dále pak nabíjí maximálním možným napětím. Toto maximální napětí (náboj) se používá s ohledem na to, aby byla udržena plná úroveň nabití a zamezení sulface (postupný vznik síranu olovnatého) kyseliny.

Čtyři články LiFePO_4 mohou mít maximum v 3,6 V na článek, což je zároveň maximální možné napětí, které je doporučeno pro nabíjení těchto akumulátorů. To znamená, že by mělo dojít k odpojení článků po překročení této hodnoty, ale automobily nabíjejí během jízdy tzn., že by nedošlo k odpojení. A pak by mohlo dojít k značnému snížení životnosti baterií. Proto bude záležet na budoucím vývoji, zda budou moci tyto baterie postupně nahradit olověné a budou doplněny o BMS. Dále pak proti těmto akumulátorům hovoří to, že dobře nesnáší nízké teploty u který pak reagují stejně jak bylo popsáno výše u Li-Ion akumulátorů.

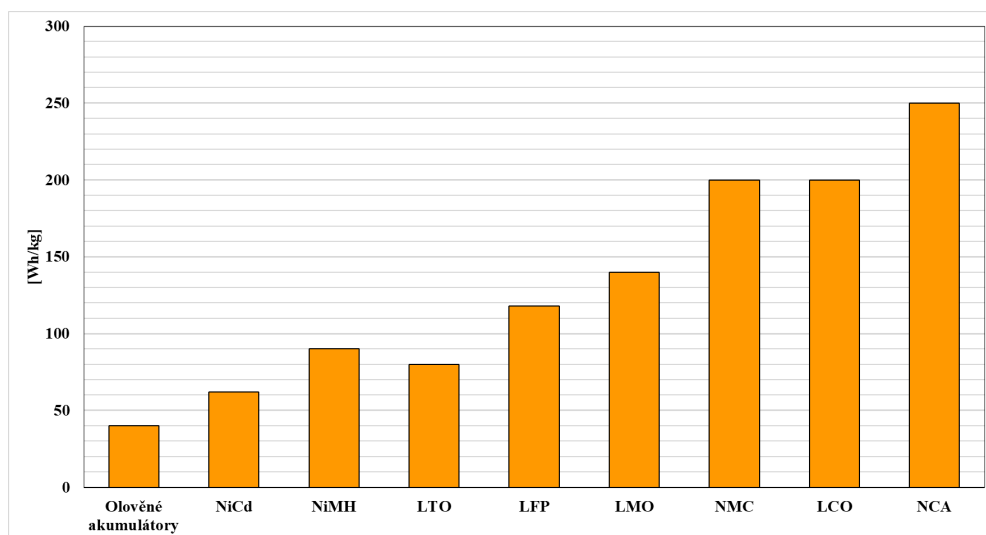
Výhody LiFePO_4 akumulátorů:

- Větší počet nabíjecích cyklů
- Teplotní stabilita a s ní i bezpečnost
- Větší tolerance v nabíjecích podmínkách

Nevýhody:

- Menší napětí na jednotlivé články (3,2 V na článek)
- Rychlejší samovybíjení, což může způsobovat problémy při balancování na starších člancích

2.3.4 Srovnání akumulátorů



Obr. 2.2: Srovnání různých druhů akumulátorů vzhledem k uložené energii na kg (Wh/kg) [5].

Ve srovnávacím grafu (Obr. 2.2) můžeme vidět, různé druhy akumulátorů (olověné, niklové a lithiové). Ačkoliv by se zdálo, že nejlépe vychází lithium-hliníkové (NCA) akumulátory, tak je třeba vzít v potaz více faktorů. Přesto, že v sobě tyto akumulátory udrží nejvíce energie, tak v oblasti teplotní stability jsou na tom lépe lithium-manganové (LMO) a lithium-fosfátové (LFP). I při mnohem nižší kapacitě lithium-titanátové (LTO), vlastně vydrží mnohem déle nabitě a také vydrží více nabíjecích a vybíjecích cyklů, takže přežijí výše zmíněné. Proto je vždy třeba hledět na aplikaci, na jakou bude náš akumulátor používán.

Nejpodrobněji budou srovnány Li-Ion a LiFePO_4 , vzhledem k možnosti užití pro tuto práci. Pro srovnání za Li-Ion akumulátory byl vybrán častý druh akumulátorů LiCoO_2 , již zmíněný dříve.

Tab. 2.1: Obecný přehled a rozsahy hodnot Li-Ion akumulátorů [5].

Li-Ion [LiCoO_2 - LCO (Lithium Cobalt Oxide)]	
Napětí	3,6 V jmenovité napětí; typické nabíjecí a vybíjecí napětí v rozsahu 3,0 - 4,2 V na článek
Kapacita	Vztažená na váhu v kilogramech je 150 - 200 Wh/Kg
Nabíjecí proud (poměrem C)	0,7 - 1C; pro většinu akumulátorů je pak maximální napětí 4,2 V. Nad 1C je již zkracována životnost akumulátoru.
Vybíjecí proud (poměrem C)	1C při minimálním napětí 2,5 V. Vybíjecí nad 1C opět zkracuje životnost.
Cykly (nabíjení/vybíjení)	500 - 1000, ale velmi záleží na zacházení s akumulátory
Teplota	typicky 150°C, při plném nabití vzniká teplotní ztráta, mohou být nebezpečné
Užití	Mobilní telefony, laptopy, kamery, tablety

Tab. 2.2: Obecný přehled a rozsahy hodnot LiFePO₄ akumulátorů [5].

LiFePO₄ [LiFePO ₄ - LFP (Lithium Iron Phosphate)]	
Napětí	Většinou 3,2 V nebo 3,3 V jmenovité napětí; typické nabíjecí a vybíjecí napětí v rozsahu 2,5 - 3,65 V na článek
Kapacita	Vztažená na váhu v kilogramech je 90 - 120 Wh/Kg
Nabíjecí proud (poměrem C)	1C; pro většinu akumulátorů je pak maximální napětí 3,65 V. Nad 1C je již zkracována životnost akumulátoru.
Vybíjecí proud (poměrem C)	1C; na některých článcích až 25C a zvládají i pulzy 40A po dobu 2 s; pod 2,5 V je minimální možné vybíjecí napětí, pod 2 V může dojít k poškození
Cykly (nabíjení/vybíjení)	2000 a více, záleží na zacházení a především hloubkách vybíjení
Teplota	typicky 270°C, velmi bezpečné i největším možném nabití
Užití	Všechna přenosná zařízení, které potřebují velké nabíjecí proudy a dlouhou výdrž

3 Balancování

Vždy je třeba nejprve vzít v potaz, zda naše aplikace vyžaduje balanční obvod. Pokud používáme akumulátory na napájení dálkových ovládaní, drobné osvětlení apod., je vzhledem k ceně zařízení nepříliš vhodné používat balančních obvodů jednoduše proto, že cena balančního obvodu by mohla přesáhnout cenu vlastního zařízení. Dále také pořizovací cena těchto akumulátorů je příliš nízká na to, aby bylo potřebné zvyšovat jejich životnost. Avšak pokud se jedná o průmyslové akumulátory, které mají nabíjet manipulační přístroje a je od nich očekávaná velká životnost, bude žádoucí zavést balanční obvody proto, aby se maximálně zvýšila efektivita jejich využívání a tím i jejich životnost.

Je tedy důležité zohlednit především v jaké aplikaci akumulátory využíváme, co od nich požadujeme, jaká je předpokládaná životnost, s jakým cenovým rozpočtem pracujeme, obecně jaká je představa funkčnosti zařízení. Akumulátory ze stejné řady (stejný obal, kapacita, životnost, atd.) se vyrábí tak, aby byly parametry vždy totožné. Toho však není nikdy dosaženo.

Reálná článková baterie (uskupení článků, které tvoří akumulátor) může být nevybalancován z několika důvodů. Balanční obvody se zabývají jeho stavem nabití (ten udává procentuální hodnotu náboje, co je k dispozici ku náboji, který je k dispozici při plném nabití, angl. State Of Charge dále jen SOC). Pokud máme ideální články, tak jejich SOC s časem neklesá vůbec a zůstává na 100%. U reálných článků však dochází k samovybíjení a to navíc tak, že jednotlivé články mají jinou strmost, s jakou klesá SOC. Navíc je třeba počítat s tím, že v počátku mají všechny články různé náboje. Pokud bychom se o balancování nestarali, tak by docházelo ke snižování životnosti jednotlivých článků v článkovém akumulátoru.

Jinými slovy, článková baterie je vždy limitován výkonem akumulátorů/baterií s nejnižší kapacitou. Je proto třeba dohlížet na jednotlivé články packu a starat se o co nejrovnoměrnější nabíjení (vybíjení). Pokud by nedošlo k zohlednění výše zmíněných jevů hrozí následující problémy:

- Tepelné přetížení

Jelikož jsou Li-Ion baterie velice citlivé na přebíjení a podbíjení, může se stát, že ačkoliv ostatní baterie se ještě stále nabíjejí na svojí nominální hodnotu, tak jedna této hodnoty už dosáhla a začne se přebíjet, tím může dojít k tepelnému ohřevu a v nejhorším případě i okamžitým zničení akumulátoru, ve standardních případech pak dochází k postupnému snižování životnosti akumulátoru.

- Degradace článku

I pouhé přebíjení akumulátoru (např. nabíjením 4,25 V a ne 4,2 V) o 0,05 V může mít za následek zvýšení degradace článku až o 30%.

- Nekompletní nabíjení článkové baterie

Časem se může stát, že některé články z článkové baterie ztratí svou kapacitu, tím se stanou problémem pro ostatní články. Pokud mají články nižší kapacitu nabíjí se a vybíjí pomaleji, tím jsou ovlivněny ostatní články, protože pokud zařízení zastavuje nabíjení při maximální kapacitě (nebo minimální) jakéhokoli článku, ostatní jsou buďto plně nenabity nebo nevybity.

3.1 Rozdíly aktivního a pasivního balancování

V případě pasivního balancování dochází k tomu, že nadbytečná energie nejvíce nabitého akumulátoru je přeměna v teplo. U aktivního balancování je pak tato energie přerozdělena ostatním článkům a tedy není promrhána/plýtvána.

Nevýhody pasivního balancování jsou očividné:

- Plýtvání energií (přeměnou v teplo) je ve své podstatě drahá záležitost.
- Při větším množství přeměňovaného tepla, může docházet i k ovlivňování životnosti článkové baterie, protože zvětšujeme teplotu, které jsou články vystaveny.

Na první pohled se může zdát, že aktivní balancování je bezpodmínečně lepší způsob, protože nedochází k plýtvání přebytečné energie, ale i aktivní balancování má jisté nevýhody:

- Obvody aktivního balancování obsahují mnohem větší počet komponentů (zabírají tím pádem více místa), mají vyšší pořizovací cenu a spolehlivost obvodů je nižší.
- V případě záložního módu (článková baterie je držena nabitá) může docházet k vyššímu plýtvání než při ekvivalentním pasivním balancování.

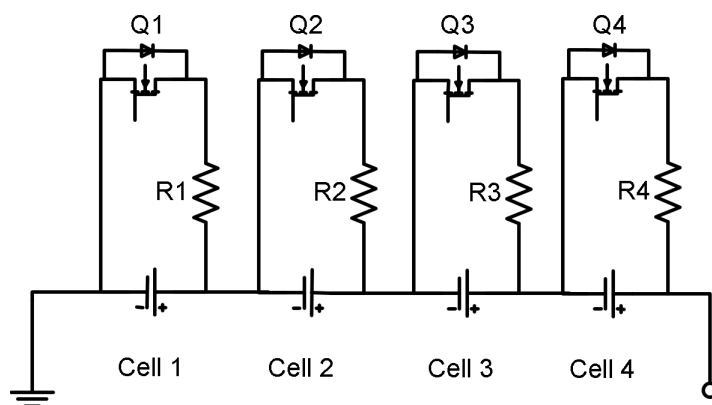
Doporučení (z [14]), kdy používat aktivního balancování jsou následující:

- Pokud se jedná o velké článkové baterie s mnoha různými SOC (v podstatě životností) a je očekávané, že jednotlivé články budou postupem času vyměňovány.
- Pokud je potřeba vybalancovat články v krátkém čase což bude provedeno při velkých proudech
- Je nežádoucí, aby se energie přeměňovala v teplo. Ačkoliv je aktivní balancování dražší, je třeba zohlednit, zda cena ztracené energie "nevyrovná" cenu, kterou by stálo případné aktivní balancování oproti pasivnímu

- Je lepší alternativou, pokud používáme SMD (Surface Mount Device - povrchová montáž součástek) rezistory (jsou limitovány maximální teplotou, které můžou dosahovat IO (integrovaný obvod) v na DPS (deska plošných spojů).

3.2 Pasivní balancování

Jak již bylo řečeno, tak v případě pasivního balancování je všechna přebytečná energie, které by vytvářelo nevyrovnanost mezi články článkové baterie, jednoduše přeměněno na rezistoru v teplo.



Obr. 3.1: Schéma znázorňující pasivní balancování [13].

Na Obr. 3.1 můžeme vidět znázornění pasivního balancování článků. Jednotlivé bateriové články jsou sériově spojeny. Jednotlivé buňky mají své rezistory (R_1 , R_2 , R_3 , R_4), přes které je přebytečné napětí vybíjeno. Mikrokontrolér (v našem případě měřící obvod, který je napojen na MCU) sleduje napětí na článcích a pokud toto napětí dosáhne hodnoty, která přesahuje požadovanou, vyšle signál spínači (na Obr. 3.1 tranzistory značeny Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4), který obvod uzavře a dojde k vybíjení přebytečného napětí přes rezistor. Jedná se o jednoduchou a přímočarou metodu.

3.3 Aktivní balancování

Existují různé přístupy toho, jak aktivně balancovat články (Obr. 3.2):

1. **Z článku do článku** - energie se přesouvá mezi sousedními články (je vhodné pro malé akumulátory).

Klady - jednodušší, menší počet DC/DC převodníků (zde tvoří část, která vyrovnává napětí mezi jednotlivými články).

Zápory - balancování trvá déle, při převádění mezi články se zvětšuje ztráta

(efektivita přenosu) a tedy při přenosu energie mezi prvním a posledním článkem je účinnost velmi nízká.

2. **Z článku do akumulátoru** - energie z nejvíce nabitých článků se přerozdělí do celého akumulátoru.

Klady - vysoká účinnost vzhledem k jednoduchosti.

Zápory - účinnost může být i nevýhodou (okolo 80 %) tzn. záleží na aplikaci.

3. **Z akumulátoru do článku** - energie z celého akumulátoru se přesouvá do nejméně nabitých článků (vhodné pokud máme nabíječ se stejným počtem výstupů, jako je počet článků).

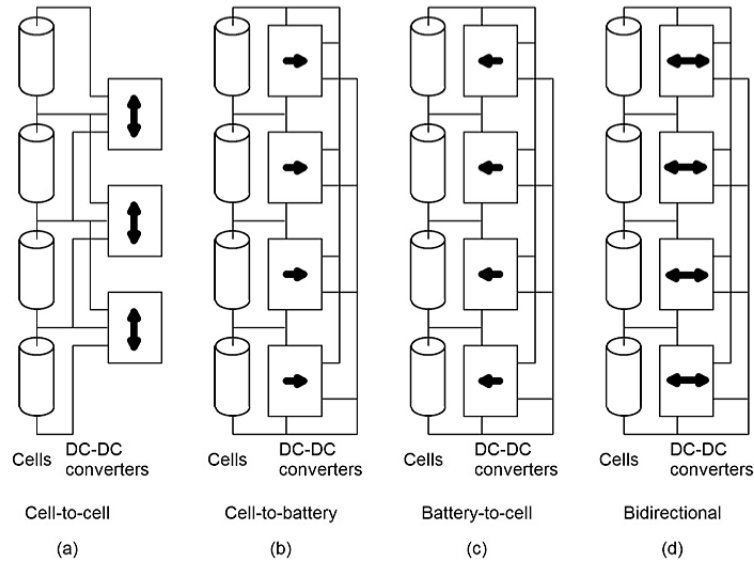
Klady - největší účinnost, pokud má majorita článků nízkou kapacitu: operuje více převodníků.

Zápory - vyžaduje vysokonapěťové transistory, které musí být izolované (vysokonapěťová část), nízká účinnost (70 %) při malém napětí.

4. **Obousměrné** - z článku na akumulátor a opačně dle potřeby (je nejvhodnější pro přerozdělování - technika, která přerozděluje energii článku s největší kapacitou tak, aby nebyl článek s nejmenší kapacitou limitní faktor pro celý battery pack).

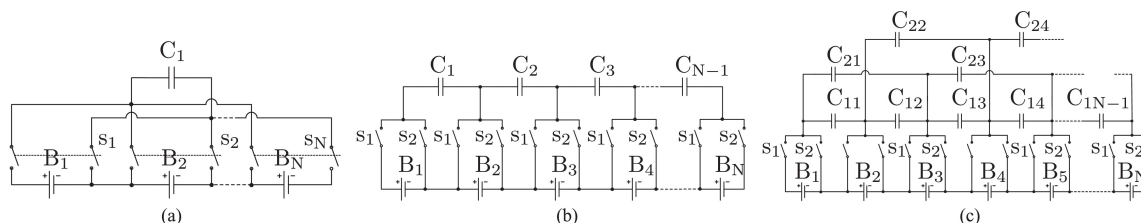
Klady - nejlepší přerozdělování energie.

Zápory - nejkompexnější.



Obr. 3.2: Techniky aktivního balancování: (a) z článku do článku, (b) z článku do akumulátoru, (c) z akumulátoru do článku a (d) obousměrné [14].

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny tři jednodušší metody aktivního balancování. Užívají se spíše pro menší baterie/akumulátory (nižší napětí i proudy) a jejich předností může být velikost a absence transformátorů.



Obr. 3.3: Obvody aktivního balancování: (a) plovoucí kapacitor, (b) přepínaný kapacitor, (c) dvouvrstvý přepínaný kapacitor [14].

V případě (Obr. 3.3a) je princip takový, že se neustále sleduje napětí všech článků (B_1 až B_N). Hledají se články s nejvyšším a nejnižším napětím, pokud absolutní hodnota jejich rozdílu přesahuje nějakou námi stanovenou hodnotu (často 0,01 V) dojde k balancování těchto článků mezi sebou. Nejprve se k pomocnému kapacitoru (C_1) připojí článek s nejvyšším napětím a to pomocí spojených spínačů s_1 (s_2 až s_N). Článek se začne vybíjet do kapacitoru, ten se naopak nabíjí. Po určitém časovém úseku (pomocí vnitřního časového obvodu) se článek odpojí a následně se připojí článek s nejnižším napětím. Ten se od pomocného kapacitoru částečně nabije a vzroste jeho napětí. Tímto způsobem neustále dochází k balancování článků mezi sebou. Z tohoto důvodu se obvod nazývá plovoucí kapacitor (angl. Flying Capacitor), protože dochází k neustálým změnám na kapacitoru.

Přepínaný kapacitor (Obr. 3.3b) je principiálně podobný, ale zde mají vždy sousední články sdílený kapacitor, který nabíjí (vybíjí). Paralelně se přepínající kapacitory pak postupně vyrovnávají celý všechny články. Metoda je komplexnější pro celý obvod, ale pokud jsou nejvíce nevyrovnané články na začátku a konci sériově spojených baterií, nebude změna tak rychlá, protože narozdíl od (Obr. 3.3a) se nezaměřujeme přímo na jednotlivé články, ale na článkovou baterii jako celek.

Problém Obr. 3.3b pak řeší dvouvrstvý přepínaný kapacitor (Obr. 3.3c), kdy se sníží transportní čas energie (rychlejší vyrovnávání) např. z krajních článků.

4 IoT

IoT neboli Internet of Things je koncept, který se v podstatě zabývá tím, jak připojit do společné sítě věci nepřipojené. Má za cíl spojovat výpočetní zařízení, mechanické a digitální stroje a všeobecné objekty. Například sběr dat z elektroměrů spočívá v tom, že pracovník musí dorazit na místo elektroměru a odečíst hodnotu. Pokud by však bylo na elektroměru zařízení, které odešle tuto hodnotu na nějakou společnou centrálu, bylo by umožněno vynechat z tohoto procesu lidskou práci. Dále např. pouliční osvětlení, které bude šetřit energii tím, že pokud není důvod (pro koho) svítit, tak se vypne. Obrovská škála senzorů, které hlídají osvětlení, teplotu, vlhkost nebo bezpečnost. U všech zmíněných zařízení jde především o konektivitu. Nejlepším příkladem je zřejmě doprava, moderní automobily si předávají různé informace o situaci na silnici, a pak řidiče upozorní, zda například není někde v blízké vzdálenosti dopravní zácpa a navrhnou řešení. Zde funguje interakce mezi zařízeními a člověkem.

Stěžejní článek IoT je komunikace, ta má několik způsobů řešení. Na krátké vzdálenosti je to Bluetooth (telefony, sluchátka a obecně elektronika, kterou máme stále při sobě), pro střední vzdálenosti Wi-Fi nebo ZigBee (zařízení, která jsou spojená například v jednom bytě, případně domě nebo průmyslu) a na dlouhé vzdálenosti především (WAN - Wide Area Networks, nebo také LPWAN - Low-Power Wide-Area Networks) Sigfox, NB-IoT a LoRaWAN. NB-IoT zajišťuje extrémně nízkou spotřebu energie a především umožňuje připojení do sítě LTE, tzn. není třeba implementovat lokální síť. Sigfox nahrazuje Wi-Fi, tam kde je její dosah moc malý a také buňkovou komunikaci tam, kde je příliš drahé ji implementovat nebo spotřebovává příliš mnoho energie. Užívá se především pro M2M (machine to machine) komunikace jako je pouliční osvětlení, bezpečností zařízení, environmentální senzory atd.

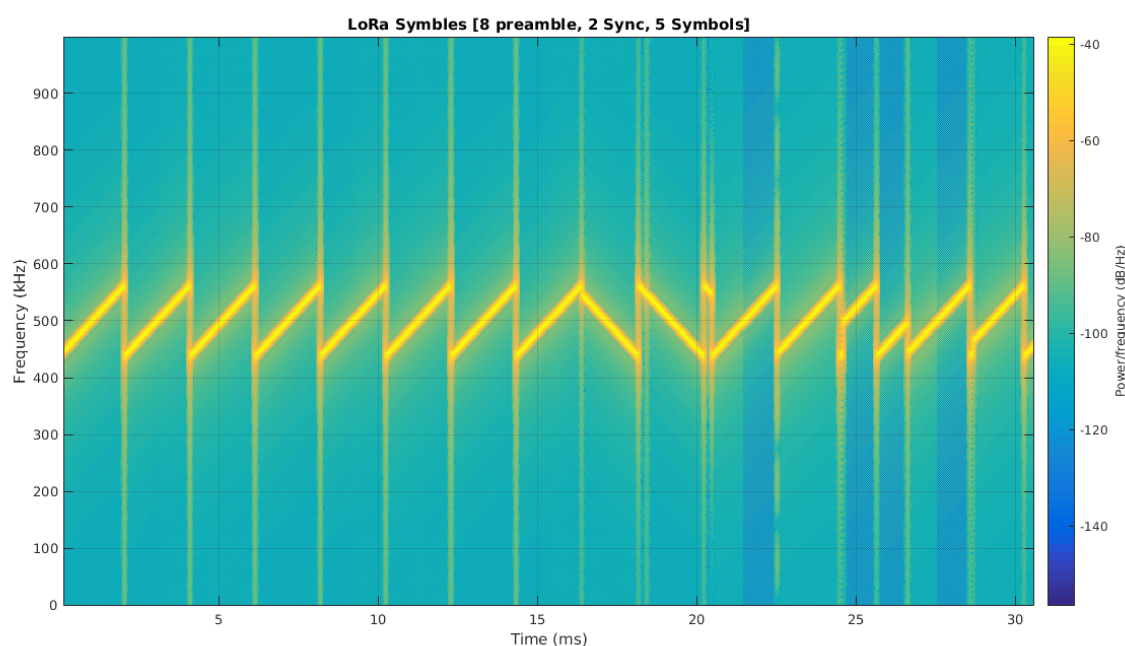
4.1 LPWAN - LoRa

Nejprve je třeba vysvětlit o jaké pojmy se zde jedná. LoRa neboli *Long Range* je technologie, která umožňuje specifickou modulaci dat do elektromagnetických vln, které umožňují komunikaci na velké vzdálenosti. LoRaWAN je komunikační protokol a architektura celé sítě. LoRa je tedy modulace a LoRaWAN je vlastně druh architektury nebo specifikace komunikace díky této modulaci. Zařízení v LoRaWAN využívají protokolů, umožňujících zařízením se probudit v jimi stanovený čas a jednoduše zahájit komunikaci s přístupovým bodem/bránou (dále jen gateway) bez jakékoliv předchozí komunikace, což je vlastně jedna z nejdůležitějších vlastností pro celou problematiku.

Fyzická vrstva (LoRa) pracuje na modulaci, která byla vyvinuta firmou Semtech. Jedná se o modulaci pracující na principu Chirp Spread Spectrum (dále jen CSS), která díky malé potřebě datového toku výrazně zvětšuje pokryté vzdálenosti.

Modulace

Princip CSS spočívá v plynulém přechodu mezi dvěma frekvencemi a to buďto z nižší frekvence na vyšší (chirp-up) nebo z vyšší frekvence na nižší (chirp-down). Určujícími faktory těchto přechodů jsou šířka pásma a délka rozmítání. Šířka pásma, pro které jsou tyto přechody stanoveny je buďto 125, 250 nebo 500 kHz. Pokud je doba rozmítání dlouhá je jednoduché dekodovat informace, avšak pokud je krátká, je možné přenést více informací, ale zato je těžší informace z modulace dekodovat. Využívaná jsou bezlicenční frekvenční pásma 863-870 MHz (Evropa). Pracuje však také na 433 nebo 169 MHz. Největšími výhodami jsou především: nízký vysílací výkon, odolnost vůči degradaci kvality signálu, útlumu a Dopplerovu jevu (tedy vhodné pro pohybující-se zařízení).



Obr. 4.1: Spektrogram fyzické vrstvy LoRa. Počátek vysílání se skládá z 8 chirp-up rozmítání (předmluva angl. preamble) následovaných 2 chirp-down rozmítáními (synchronizace), následují data [20].

Jak již bylo řečeno, tak zahájení komunikace s přístupovým bodem může libovolné zařízení, které tak provede pomocí sekvence zobrazené v Obr. 4.1. Vysílací zařízení je po vyslání počátečních signálů časově limitováno do kdy může dokončit zbytek přenosu (úřady regulují duty cycle). Po synchronizaci jsou odesílány symboly. Každý symbol obsahuje diskretní frekvenční krok, který symbolizuje 8 bitů.

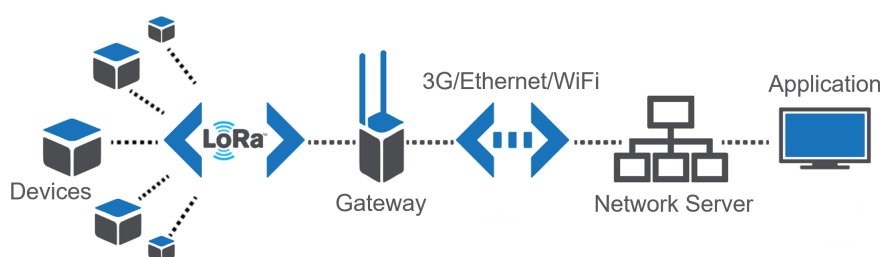
Vlastnosti LoRaWAN systému

Gateway využívá mnoha přijímačů a může demodulovat více kanálů zároveň, slouží jako přemostění dat mezi dvěma koncovými body (dále jen endpoint) (např. od změření dat, až k zobrazení na telefonu uživatele). Endpointy mohou komunikovat buď s jedním nebo i více gateway.

Datový tok LoRaWAN závisí na ADR (Adaptive Data Rate), což je algoritmus, který spravuje datové toky a signály každého endpointu. Zajišťuje, že jsou data doručena v nejlepším možném datovém toku a že celkový výkon sítě je optimální. Endpointy, které jsou blízko ke gateway, mohou přenášet ve vyšších datových tocích, což umožňuje kratší časy přenosu a nízký přenosový výkon. Naproti tomu endpointy na okraji dosahu gateway vysílají s nízkým datovým tokem a největším přenosovým výkonem.

Topologie sítě

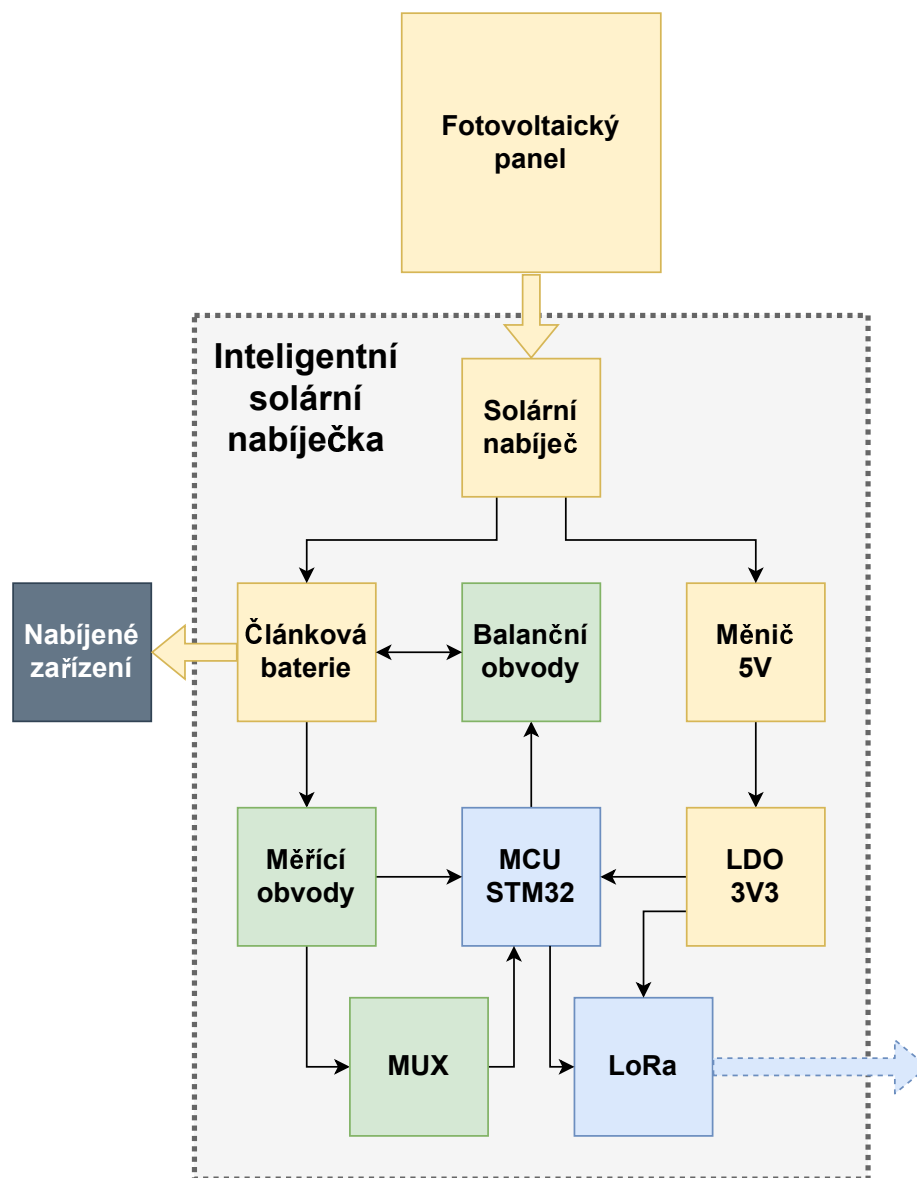
Již bylo zmíněno, že infrastruktura sítě se skládá z endpointů, které si vyměňují data s gateway, které se chovají jako přemostění k LoRaWAN síťovým serverům a následně se mohou dostat až k uživateli (endpointu). Na následujícím obrázku je tato síť zobrazena.



Obr. 4.2: Architektura sítě LoRaWAN [21].

5 Výběr periférií

Na základě následujícího blokového schématu budou postupně vybrány jednotlivé části obvodu a zdůvodněn jejich výběr. Především bude přihlášeno na spotřebu energie (jelikož se jedná o akumulátorově napájené zařízení), efektivitu jednotlivých periférií a velikost výsledného zařízení.



Obr. 5.1: Blokové schéma výsledného zařízení.

5.1 Fotovoltaický panel

Bylo třeba vybrat vhodný fotovoltaický panel pro nabíječku. Bylo nahlíženo především na to, aby se celkově jednalo o mobilní zařízení a tedy hlavní snahou bylo vybrat zejména "rozumnou velikost". Dalším důležitým faktorem bylo, aby sledovaný MPPT byl větší než součet napětí všech čtyř článků baterie.

Byl vybrán polykrystalický panel WS-10/12V od firmy *WAAREE*, který obsahuje 36 solárních článků v uspořádání 9 na 4. Ačkoliv polykrystalické panely dosahují mírně nižších účinností než monokrystalické panely, tak je pro tuto aplikaci vhodnější užít polykrystalický z důvodu velikosti, ceny a mírně rovnoměrnější produkce výkonu. Vlastnosti vybraného panelu jsou v Tab. 5.1 (na další straně). Pro další návrh a implementaci panelu jsou nejdůležitější parametry: P_m (výkon panelu), V_{mp} (napětí, které se bude obvod snažit sledovat) a I_{mp} (maximální proud, který může při V_{mp} panel dodávat).

5.2 Akumulátory

Článeková baterie (akumulátor) zobrazená na Obr. 5.1 bude tvořena čtyřmi akumulátory, které budou následně nabíjet připojené zařízení. Po těchto akumulátorech je vyžadován především dobrý poměr rozměrů a uchované energie. Jeho další parametry jsou v Tab. 5.1.

Při výběru bylo nahlíženo také na to, jakým typickým proudem mají být akumulátory nabíjeny. Touto eliminací byl nakonec vybrán akumulátor INR18650F1L od firmy *LG Electronics*. Jeho jmenovité specifikace jsou zapsány v tabulce Tab. 5.2.

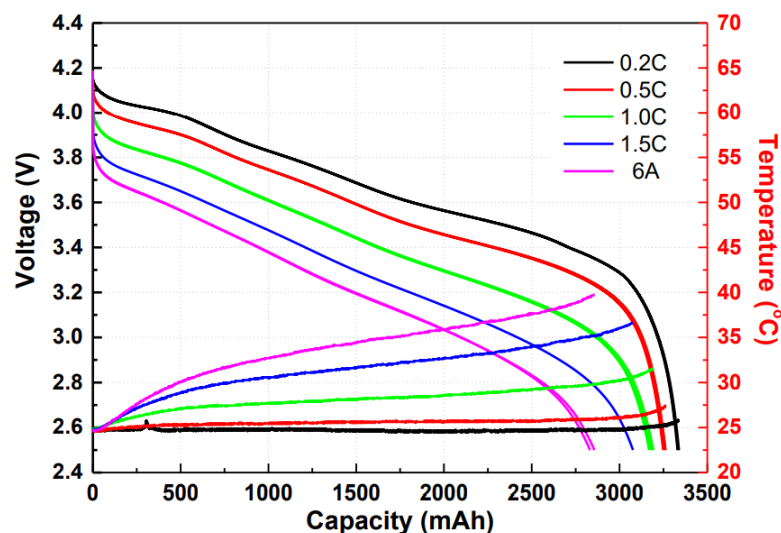
Tento vybraný akumulátor má jmenovitou kapacitu 3250 mAh (už od začátku je brána v potaz spodní hranice kapacity, protože akumulátor reálně stejně nedosáhne zde vypsanych hodnot), lze tedy předpokládat přibližnou kapacitu celé článkové baterie 13000 mAh. Jmenovitá průměrná hodnota napětí je 3,63 V a nabíjecí napětí 4,2 V. Nabíjecí metodou je metoda konstantní proud-konstantní napětí. Tento akumulátor byl vybrán proto, že standardní nabíjecí proud je 0,3C (975 mA), avšak fotovoltaický panel je schopný při svém výkonu dodávat maximální proud 630 mA. To znamená, že akumulátor by nedosahoval tak rychlých nabíjecích časů a mohlo by docházet ke snižování životnosti, avšak solar charger by měl tuto skutečnost vyřešit. Maximální možný nabíjecí proud je 0,5C (1625 mA), ačkoliv užívání této hodnoty nabíjecího proudu už má za následek větší degradaci akumulátoru. Jiné akumulátory v této kategorii měly příliš velké jmenovité nabíjecí proudy a to by mohlo mít za následek případné snížení životnosti, zároveň ale není kapacita tohoto vybraného akumulátoru příliš odlišná od akumulátorů s vyšším nabíjecím proudem (stejně rozměry). Tabulka dále obsahuje také důležité hodnoty teplot v různých stavech.

Tab. 5.1: Charakteristika vybraného fotovoltaického panelu WS-10/12V [6].

Elektrické a mechanické vlastnosti fotovoltaického panelu	
Model	WS-10 / 12 V
Nominální maximální výkon, P_m [W]	10
Napětí naprázdno, V_{OC} [V]	21,07
Proud nakrátko, I_{SC} [A]	0,63
Napětí při maximálním výkonu, V_{MP} [V]	17,03
Proud při maximálním výkonu, I_{MP} [A]	0,59
Účinnost modulu [%]	9,52
Délka x šířka x tloušťka [mm]	300 x 350 x 22
Váha [kg]	1,35
Počet článku na modul / Uspořádání	36 / (9x4)

Tab. 5.2: Charakteristika vybraného akumulátoru INR18650F1L [7].

Parametr	Poznámka	Specifikace
Kapacita	Standardní nabíjení, vybíjení	Nominální = 3350 mAh Minimální = 3250 mAh
Nominální napětí	Průměrně	3,63 V
Standardní nabíjení	Konstatní proud konstantní napětí konečný proud	0,3C (975 mA) 4,2 V 50 mA
Maximální nabíjecí napětí		4,2 \pm 0,05 V
Maximální nabíjecí proud		0,5C (1652 mA)
Standardní vybíjení	Konstantní proud Konečné napětí	0,2C (650mA) 2,5 V
Maximální vybíjecí proud	-20 - 5°C 5 - 45°C 45 - 50°C	0,5C (1625 mA) 1,5C (4875 mA) 1,5C (4875 mA)
Váha	Přibližně	49,0 g
Provozní teplota	Nabíjení vybíjení	0 - 45°C -20 - 50°C (teplota obalu článku 60°C)



Obr. 5.2: Průběh napětí a teploty v závislosti na kapacitě u INR18650F1L [8].

5.3 Řídící obvod nabíjení akumulátorů (Solar charger)

Tento obvod se bude starat o co nejefektivnější a nejrovnoměrnější dodávání napětí z fotovoltaického panelu do článkové baterie (bude se snažit udržet MPPT) a dohlížet na akumulátory z hlediska životnosti.

V tomto případě byl vybrán integrovaný obvod BQ24650 od firmy *Texas Instruments*. Jedná se o řídicí obvod nabíjení baterií/akumulátorů, který poskytuje regulaci vstupního napětí, které snižuje nabíjecí proud, pokud klesne pod danou hodnotu. Pokud je vstup napájen ze solárního panelu, tak vstupní regulace snižuje nabíjecí proud tak, aby dokázal na výstupu dodávat maximální výkon. Tento obvod dále nabízí: řízení pomocí PWM (Pulse Width Modulation - pulzně šířková modulace), přednabíjecí cykly, ukončení nabíjení a sledování nabíjecího stavu. Dále pak MPPT, jehož nastavení lze i programovat. Na vstupu nabízí rozsah fotovoltaických panelů od 5 V do 28 V a zároveň je vhodný pro téměř všechny druhy baterií (v tomto případě Li-Ion). Rozsah nabíjecího napětí je v rozmezí 2,1 až 26 V

BQ24650 nabíjí baterie/akumulátory v třech fázích: přednabíjení, konstantní proud a konstantní napětí. Přednabíjecí cyklus má časovač, který je nastaven na 30 minut (baterie se v této době uvádí pomalu do nabíjecího režimu). Obvod umí automaticky znovu zapnout nabíjecí cyklus, pokud napětí baterie/akumulátoru klesne pod vnitřní prahové napětí.

Obvodu bude dále věnováno více prostoru v části návrhu.

5.4 DC/DC měnič typu step-down

Pro napájení většiny dalších periférií (především MCU) je třeba nižší a stabilnější napětí, než které bude mít celý bateriový článek. Nejprve je zapotřebí napětí, které může dosahovat přibližně 14,4 V, snížit na ideálně 3,3 V. Nevhodnou volbou by bylo snažit se o co nejpřesnější snížení přímo z bateriového článku, proto se zde nejprve nachází DC/DC měnič (step-down), snižující napětí na 5 V. Pokud by byla snaha napětí snižovat rovnou na 3,3 V, docházelo by k větším úbytkům napětí tzn., že obvod by produkoval více tepla a zároveň by byl i komplikovanější (možná i finančně náročnější). Takto se spokojíme s "hrubším" snížením a až poté stabilizací na ideální (téměř) hodnotu pomocí regulátoru s nízkým úbytkem.

Pro tento účel ("hrubšího" snížení napětí) byl vybrán integrovaný obvod LM2596-5.0 *Texas Instruments*. Tento stabilizátor napětí, snižuje vstupní napětí (maximálně 45 V) na 5 V. Ačkoliv má verze 5.0 účinnost okolo 80% (výstupní napětí se pohybuje v rozsahu 4,8 - 5,2V), bude to v tomto případě stačit vzhledem k následné stabilizaci pomocí LDO (angl. low-dropout regulator neboli LDO).

5.5 Regulátor napětí s nízkým úbytkem (LDO)

Po ustálení napětí na 5 V je třeba dostat požadovaných 3,3 V. K tomu slouží regulátor napětí s nízkým úbytkem. Jedná se o DC/DC měnič, který je schopný regulovat výstupní napětí i přes to, že je vstupní napětí hodnotou velice blízké výstupnímu.

Vybrán byl integrovaný obvod TPS73733DCQ od firmy *Texas Instruments*. Může zvládat proudy zátěže až do 1 A, pracující od minimálního úbytku 130 mV. Výrobce také upozorňuje, že je stěžejní připojit na výstupní pin kondenzátor s co nejnižší ESR (angl. equivalent series resistance neboli ekvivalentní sériový odpor) pro jistotu stability obvodu, přičemž jeho hodnota má být 1 μF . Dalším doporučením je kondenzátor na vstupní pin obvodu, který se má pohybovat v rozsahu 0,1 - 1 μF a snižuje případné vlivy vstupního šumu.

5.6 Mikrokontrolér - STM32

Řízení celého obvodu obstarává mikrokontrolér STM32 od firmy *STMicroelectronics*. Mikrokontrolér byl vybírán z několika hledisek. Vzhledem k nenáročným operacím, které bude zajišťovat: řízení balančního obvodu, řízení měření, sbírání dat z měření a posílání dat z měření pomocí sítě LoRa (IoT), kde budou data odesílána jen v určitých časových intervalech, tzn. obvod nebude neustále data odesílat. Také vzhledem k výskytu požadavků na nízkou spotřebu a možnost zařízení probouzet ve

zmíněných časových intervalech, připadla volba na STM32 z řady Ultra-low-power (ultra nízká spotřeba). Přesněji pak série L0, která má velice nízkou spotřebu.

Konkrétní obvod je STM32L010F4. Napájen může být v rozsahu 1,8 - 3,6 V, obsahuje 2 wake-up piny (pouze 0,23 μA odběr), USART, SPI, I2C, 16 kB Flash pamět, 2 kB RAM, interní 12-bitový ADC. Pro toto užití je dostačující. Zároveň ve své řadě má následující velmi užitečné nízko-odběrové módy:

- Sleep mode

V tomto módu je zastavena pouze CPU (Central Processing Unit neboli centrální procesorová jednotka), ostatní periférie pokračují ve funkci a mohou probudit CPU, pokud nastane přerušení/událost. Spotřeba v tomto módu se pohybuje, při 16 MHz, okolo 1 mA se všemi periferiemi vypnutými.

- Stop mode with RTC

Dosáhne nejnižšího možného odběru při zachování RAM a obsahu registrů a zároveň obvodu reálného času (zkratka RTC). Některé periférie s funkcí probuzení mohou aktivovat high speed internal RC i během stop módu, aby mohli detekovat podmínku jejich probuzení. Celé zařízení může být probuzeno pomocí EXTI (Extended interrupt/event controller) a s rychlostí 3,5 μs může procesor zareagovat na přerušení. EXTI může být jakýkoliv z GPIO.

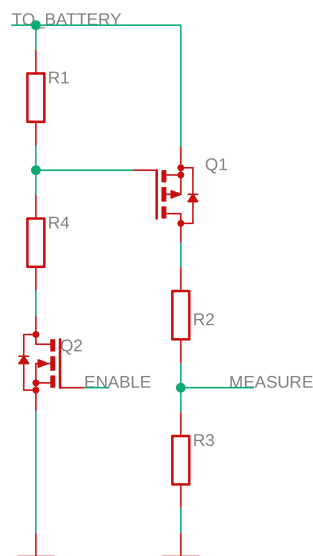
A další (Stop mode without RTC, Standby mode with RTC, Standby mode without RTC, Low-power run mode, Low-power sleep mode). Všechny zmíněné módy mohou být případně vybrány až na základě testování.

Vnitřní 12-bitový analogově digitální převodník (dále ADC) má nezávislou frekvenci od frekvence CPU, což umožňuje vzorkování až 1,14 Msps (Mega samples per second) i při nízké rychlosti CPU. Spotřeba ADC je velice malá na všech frekvencích ($\sim 25 \mu\text{A}$ při 10 ksps, $\sim 200 \mu\text{A}$ při 1 Msps). Může operovat od 1,65 V až do napájecího napětí.

5.7 Měřicí obvody

5.7.1 Měření napětí

MCU tohoto zařízení potřebuje pro balancování jednotlivých článků znát napětí na těchto článcích. Toho by mohlo být dosaženo pomocí obvodu na Obr. 5.3. Ten se skládá ze dvou unipolárních transistorů (P-FET a N-FET) a rezistoru pro nastavení proudu na N-FET. Původní návrh v semestrální práci se opíral o přesné zapojení z Obr. 5.3. Tedy odečet napětí pomocí děliče napětí z rezistorů R2 a R3.

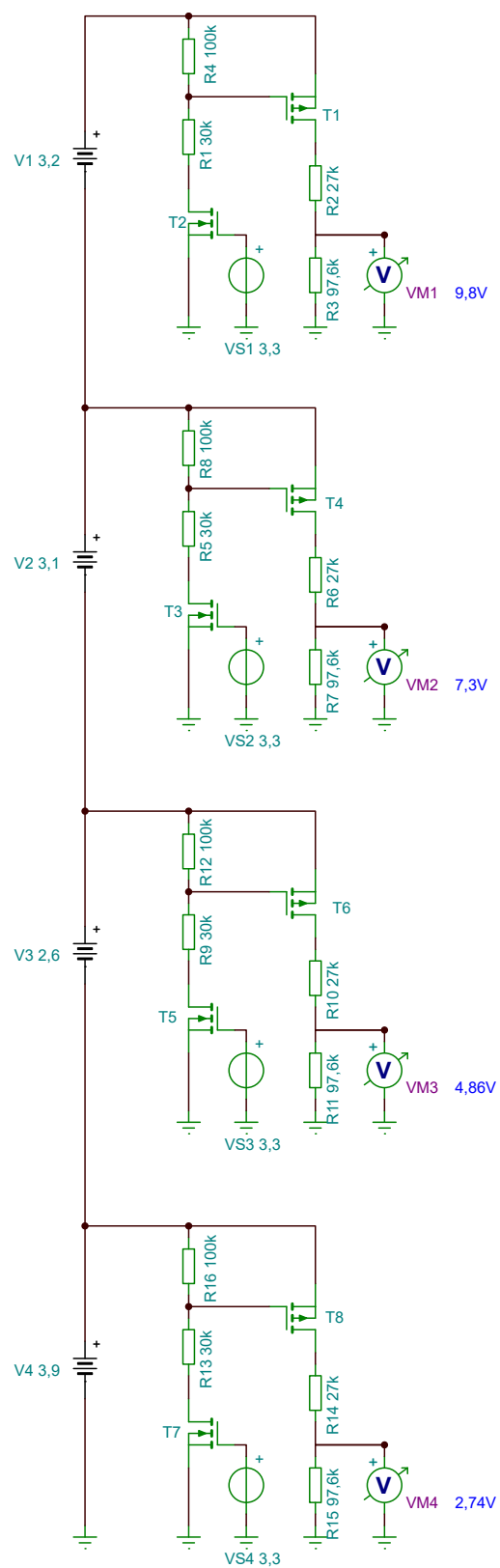


Obr. 5.3: Původní návrh obvodu pro měření napětí.

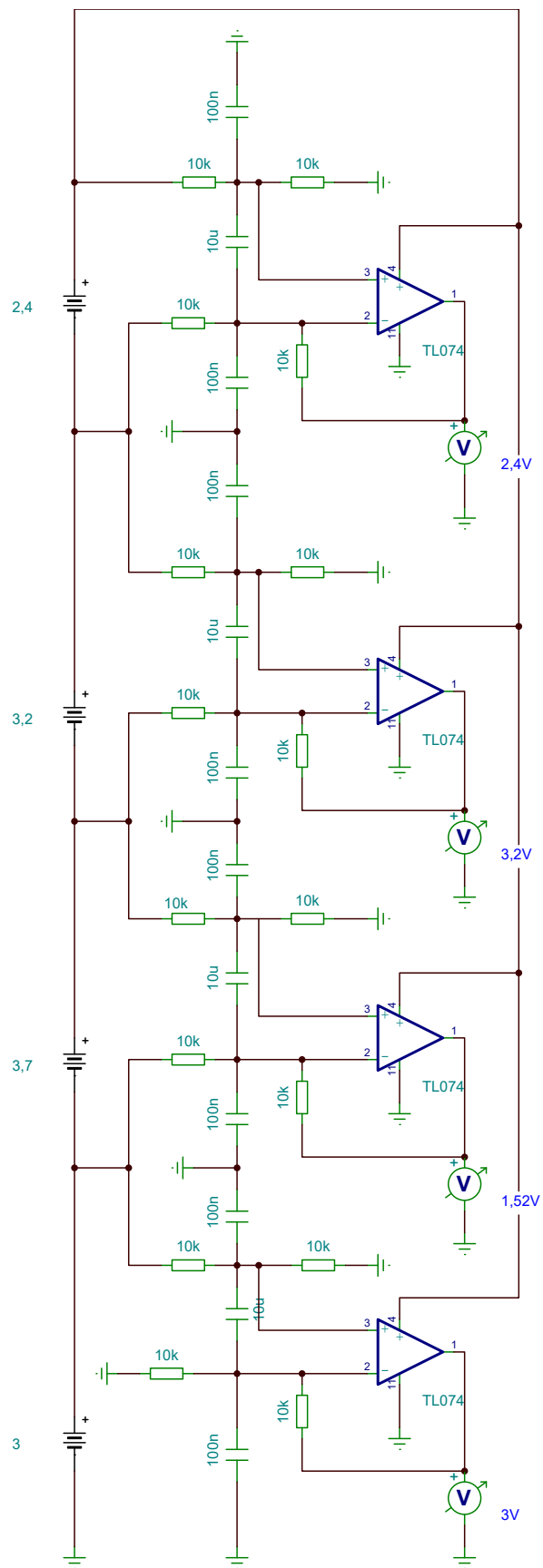
Hlavní funkce tohoto obvodu je následující: pokud je na pinu ENABLE nepovoleno měření, přes tento tranzistor neprochází žádný proud, napětí z akumulátoru zůstává na drainu tranzistoru, zároveň je tranzistor P-FET sepnutý a tudíž neprochází žádný proud a všechno jeho napětí zůstává na U_{GS} ($U_{GS} = U_{akum}$). Pokud dojde k povolení měření (vysoká úroveň na ENABLE) stahuje N-FET tranzistor napětí z gateu tranzistoru P-FET. Přes P-FET prochází proud na dělič, kde se rozdělí napětí v poměru děliče. Toto napětí se pak dostane na multiplexor a následně do interního ADC MCU. Nevýhoda tohoto zapojení je patrná ze simulace na Obr. 5.4.

Nevýhoda tohoto zapojení spočívá v nutnosti neustálého matematického přepočítávání napětí z děliče. Dále vidíme ze simulovaných hodnot (hodnoty na VM1 až VM4; VM = Voltmetr), že při měření vzhledem k zemi dochází k neustálému růstu napětí, a tedy potřebě navrhnout dělič zvlášť, protože MCU má vstupy analogově-digitálního převodníku tolerantní maximálně do 3,3 V, respektive 5 V.

Proto byla zvolena efektivnější metoda využívající zapojení operačního zesilovače jako rozdílového zesilovače. Simulace tohoto nového zapojení je na Obr. 5.5. Hlavní výhodou je, že takto měřené napětí se týká pouze jednoho akumulátoru a tedy nezavedeme chybu součtem a tím pádem jsou na sobě obvody nezávislé. Také vymizí chyba při přepočtu z děliče protože potřebu výpočtu a udává přímo hodnotu napětí na akumulátoru. Toto je zobrazeno na jednotlivých voltmetrech (VM1 až VM4 v Obr. 5.5), kdy je vidět, že napětí na akumulátorech (V1 až V4 v Obr. 5.5) odpovídá napětí na voltmetrech.



Obr. 5.4: Simulace původního obvodu pro měření napětí (pomocí softwaru TINA TI).

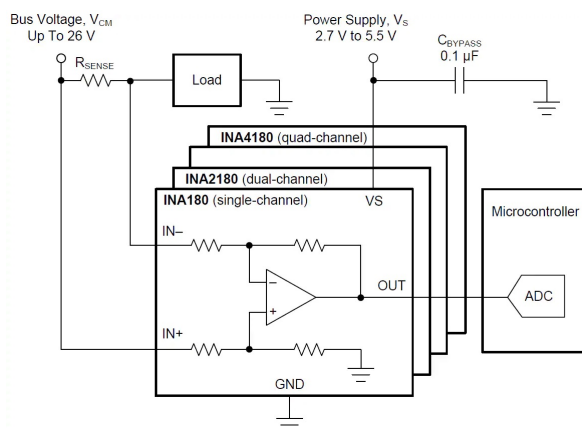


Obr. 5.5: Simulace předělaného obvodu pro měření napětí

5.7.2 Měření proudu

K měření proudu bude docházet pouze za řídicím obvodem nabíjení akumulátorů a to proto, aby bylo známo, jaký proud nabíjí celou článkovou baterii.

Za tímto účelem byl vybrán obvod INA181A1IDBVT od firmy *Texas Instruments*. Jedná se o integrovaný obvod měřící obousměrný proud (v našem případě nabíjení a vybíjení). Měřit proud může v rozsahu -0,2 - 26 V, přičemž klidový proud dosahuje maximálně 260 μA a napájení je dáno z rozsahu 2,7 - 5,5 V.



Obr. 5.6: Funkční blokový diagram integrovaného obvodu INA18x [15].

Vstupní svorky IN- a IN+ (Obr. 5.6) jsou připojeny na rezistor s nízkým odporem, řádově desítky m Ω . Napětí je přivedeno na operační zesilovač, kde dostáváme na výstup (OUT) rozdíl napětí, který je odeslán přes multiplexor do MCU. Díky zapojení sledovače s napěťovým děličem na referenční vstup (REF) může obvod, pokud je tato hodnota nastavena do poloviny napájecího napětí, měřit proud v obou směrech.

Výpočet

Možnost obousměrného měření proudu je zajištěna napětím na referenčním pinu REF. Kladné rozdílové napětí na vstupních svorkách bude znamenat, že na výstupu dostáváme napětí větší, než je referenční napětí. Obdobně, pokud je na vstupních svorkách záporné rozdílové napětí, bude na výstupu napětí menší než referenční. Výstupní napětí (V_{OUT}) je dáno [15]:

$$V_{OUT} = (I_{LOAD} \cdot R_{SENSE} \cdot GAIN) + V_{REF} \quad (5.1)$$

kde I_{LOAD} je proud, který má být měřen, R_{SENSE} je rezistor na kterém bude měřeno napětí, GAIN je zisk pro daný druh INA (v našem případě je dle [15] GAIN roven 20)

a V_{REF} je referenční napětí. Po úpravě bude proud počítán z následujícího vzorce:

$$I_{LOAD} = \left(\frac{V_{OUT} - V_{REF}}{R_{SENSE} \cdot GAIN} \right) \quad (5.2)$$

Napětí V_{OUT} bude výstupem analogově digitálního převodníku, které bude následně přepočteno na napětí (dle stanoveného rozsahu převodníku). Referenční hodnota V_{REF} bude dle doporučených zapojení z [15], stanovena jako poloviční hodnota z výstupu LDO. R_{SENSE} bude v pozdější podkapitole (6.1) stanoven na hodnotu $36 \text{ m}\Omega$ (R_{SR}) a zisk je roven 20.

5.8 Multiplexor

Pro řízení obvodu je třeba data získaná z měření odesílat do MCU, to zajistí multiplexor, který postupně bude odesílat hodnoty napětí a proudu, které si MCU zpracuje. V tomto případě se jedná o analogový multiplexor, převod na digitální informaci si zpracuje interní analogově digitální převodník v MCU.

Na tuto funkci byl vybrán integrovaný obvod 74HC4051D652 od firmy *Texas Instruments*. Jedná se o osmi kanálový analogový multiplexor. Jeho napájecí napětí je maximálně 11 V a vstupní napětí jednotlivých pinů je vždy v rozsahu GND až napájecí napětí. V tomto případě pro nás není rychlost důležitým faktorem, neboť data budou sbírána s větším časovým rozestupem. Při napájení 11 V je spotřeba proudu 50 mA, spínací proud je přibližně 25 mA. Při správném dodržení parametrů (nepřesahování napájecího napětí) by spotřeba proudu neměla být větší. Jedná se o obvyčejný multiplexor s povolovacím pinem a třemi piny na řízení toho, který vstup chceme na výstupním pinu multiplexoru.

5.9 LoRa

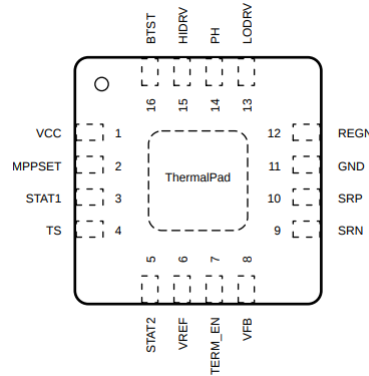
V našem případě bude roli LoRaWAN zastávat integrovaný obvod RN2483 od firmy *Microchip*, který bude s naším MCU komunikovat pomocí UART. Napájení je dáno v rozsahu 2,1 V až 3,6 V (typicky 3,3 V). Lze pomocí něho vysílat až 300 kbps při modulaci FSK, v našem případě bude vysílání probíhat pouze přes kanál 868 MHz. Druhý kanál 433 MHz bude uzemněn. Má velice nízkou spotřebu a to konkrétně (při 3,3 V napájení) 2,8 mA při nečinnosti a nejvýše 38,9 mA při vysílání.

Piny UART_RX a UART_TX budou přivedeny do MCU, stejně tak RESET. Dále RFH (kanál 868 MHz) bude přiveden na vertikální SMA konektor, který bude ochráněn TVS diodou. Před SMA konektorem bude selektivní filtr pro výše zmíněnou frekvenci a omezení příjmu jiných signálů.

6 Návrh zařízení

6.1 Solar charger

Součástí návrhu solar chargeru je pouze pár obvodových prvků, které tvoří důležité parametry obvodu. Všechny následující rovnice v této podkapitole vychází z [9].



Obr. 6.1: Rozložení pinů u BQ24650 [9].

Pomocí pinu MPPSET nastavujeme vstupní napěťový bod, který se obvod bude snažit sledovat (MPP). Pin je regulován na napětí 1,2 V, zároveň také funguje jako povolovací pin pro nabíjení, protože pokud napětí na něm klesne pod 75 mV, je nabíjení přerušeno. Pokud napětí přesáhne 175 mV opět dochází k nabíjení. V našem případě má být napětí MPPTSET 17,03 V (dáno vybraným panelem), díky znalosti tohoto napětí lze dopočítat dělič z následující rovnice

$$V_{MPPSET} = 1,2 \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) \quad (6.1)$$

Po zvolení jednoho rezistoru ve vhodném rozsahu, tedy například $R_4 = 47 \text{ k}\Omega$ vyjde po úpravě

$$R_3 = \frac{17,03 \cdot R_4}{1,2} - R_4 = 620 \text{ k}\Omega \quad (6.2)$$

Regulace nabíjecího proudu je dána rovnicí

$$I_{CHARGE} = \frac{40 \text{ mV}}{R_{SR}} \quad (6.3)$$

Hodnota 40 mV je dána fixně vnitřním obvodem. BQ24650 zde měří proud a následně provádí jeho regulaci, rezistor R_{SR} je určen na základě nabíjecího proudu, který chceme do battery packu dostávat. V datasheetu je pro tento návrh nejvhodnější hodnota $R_{SR} = 36 \text{ m}\Omega$, to odpovídá hodnotě proudu přibližně 1,11 A. Tato

hodnota proudu byla vybrána vzhledem k tomu, že vybraný akumulátor má standardní nabíjecí proud 975 mA a zároveň je třeba počítat s existencí zdrojů a také s úbytky po cestě do článkové baterie (tepelné ztráty atp.). Z této hodnoty (1,11 A) nám také vyplyne velikost $C_{OUT} = 10 \mu F$ a $L_{OUT} = 15 \mu H$. Z hodnoty R_{SR} vyplyne i další parametr: $I_{PRECHARGE}$, ten určuje velikost proudu, kterým bude akumulátor nabíjen, pokud je velmi podvybitý. Pokud není dosaženo minimálního napětí akumulátoru do 30 minut, dojde k ukončení pokusu o nabíjení, určen je následující rovnicí:

$$I_{PRECHARGE} = \frac{4mV}{R_{SR}} = 111mA \quad (6.4)$$

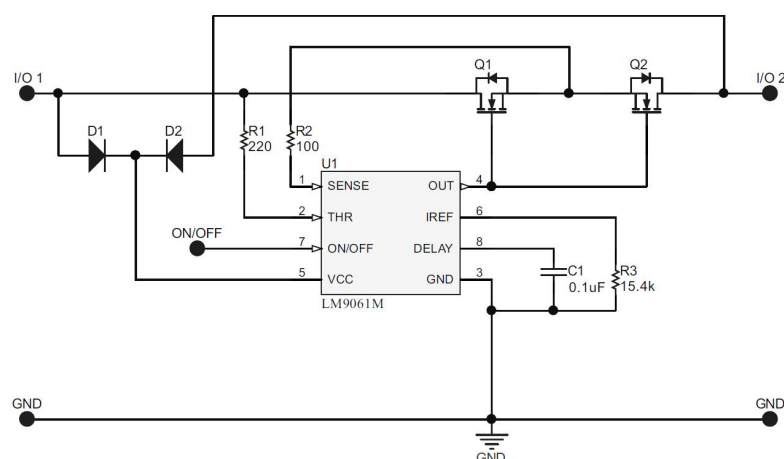
Dalším parametrem je napětí článkové baterie, které určuje dělič na výstupu. Popisuje ho následující rovnice.

$$V_{BAT} = 2,1 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (6.5)$$

Zde je třeba vzít v potaz, jaké nabíjecí napětí mají jednotlivé akumulátory. V případě INR18650F1L je nabíjecí napětí jednotlivých článků 4,2 V. Vzhledem k tomu, že napětí na výstupu nemusí být naprosto přesné a mohlo by se odchylovat, docházelo by při nabíjení vyšším napětím k rychlejší degradaci celého článku, bude proto počítáno s hodnotou 4,15 V na článek. Tím pádem je celkové nabíjecí napětí článkové baterie 16,6 V. Stejným způsobem jako byl již uveden se dopočítá jeden z rezistorů děliče ($R_1 = 68 k\Omega$).

$$R_2 = \frac{16,6 \cdot R_1}{2,1} - R_1 = 470k\Omega \quad (6.6)$$

6.1.1 Vypínač nabíjení

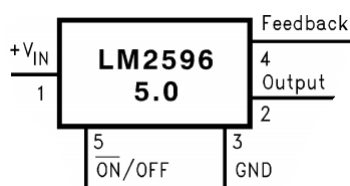


Obr. 6.2: Integrovaný obvod LM9061 zapojený jako oboustranný spínač [16].

Pokud akumulátory dosáhnou nominálního napětí a tedy jsou nabité, je třeba je odpojit od nabíjení. K tomu bude sloužit High-Side spínač, tedy typ spínače, kdy pomocí malého napětí lze spínat velká napětí nebo proudy. Za tímto účelem byl vybrán integrovaný obvod LM9061 od firmy *Texas Instruments*, který bude zapojen jako obousměrný spínač (Obr. 6.2). Spínání pak bude řídit samotné MCU.

6.2 Step-down měnič

Ačkoliv je LM2596_5.0 již jako integrovaný obvod navržen, je třeba dodržet správný výběr součástek. To zajistí stabilitu celého obvodu a správnou funkci.



Obr. 6.3: Rozložení pinů integrovaného obvodu LM2596 5.0 [10].

Pro step-down měnič, který má neregulovaný vstup a fixní výstup je třeba dodržet pár pravidel. Kondenzátor (elektrolytický), který spojuje vstupní pin $+V_{IN}$ se zemí, musí být co nejbližší tomuto pinu a všechny cesty co možná nejkratší. Nachází se zde z důvodu ochrany před vstupním šumem připojených obvodů. Stejně pravidlo platí pro zemnicí pin GND. Pin ON/OFF bude v tomto případě uzemněn, protože požadujeme stálou regulaci napětí, která nebude nutná povolovat. Výstupní pin OUTPUT by měl mít připojenu shottkyho diodu co nejbližší pinu pro ochranu obvodu a také jako zábranu před rozkmitáním. Dále je s pinem OUTPUT spojena cívka, která směřuje k zátěži, na délce vodičů tentokrát nezáleží, cívka má za funkci tlumit jakékoliv rychlé změny. Za cívku je paralelně k zátěži připojen elektrolytický kondenzátor, opět s co nejkratšími vývody a to jak na zem, tak k cívce. V poslední řadě, a vzhledem k tomu, že výstup obvodu je stanoven fixně, je pin FEEDBACK zapojen na uzel výstupního kondenzátoru a cívky, ten je třeba pouze vést dále od cívky, aby nevznikala případná vazba. Součástky byly dle datasheetu [10] vybrány následující: $C_{IN} = 680 \mu F/25V$, $C_{OUT} = 100 \mu F/10V$, $D_1 = 3A/20V$ a $L_1 = 100 \mu H/1,6A$.

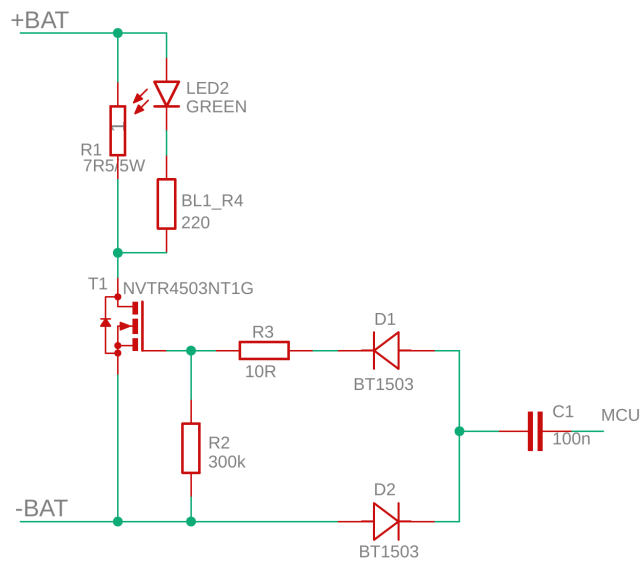
6.3 LDO

Je třeba dodržet návrh podle datasheetu [11], protože tento obvod bude napájet MCU, tudíž je žádoucí, aby bylo výstupní napětí co nejstabilnější.

Jedná se o integrovaný obvod TPS73733, tedy název napovídá, že se jedná o obvod s fixním výstupem 3,3 V, od firmy *Texas Instruments*. Při návrhu vycházíme z doporučení v [11]. Jelikož se jedná o verzi s fixním výstupem, půjde především o to vybrat součástky s vyšší přesností, aby se co nejvíce zamezilo případným odchylkám. Ačkoliv není vstupní kapacitor nezbytný, je dobré ho do návrhu zahrnout neboť částečně zabraňuje případnému šumu a také vstřebává přechodové jevy. Doporučená hodnota je $C_{IN} = 100 \text{ nF}/10\text{V}$ s co nejnižším ESR (ekvivalentní sériový odpor). A výstupní kapacitor $C_{OUT} = 1 \text{ }\mu\text{F}/10\text{V}$. Protože se jedná o verzi s fixním výstupem, je třeba pin FB (feedback) připojit k zemi přes kapacitor $C_{FB} = 10\text{ nF}/10\text{V}$ pro lepší šumové vlastnosti.

6.4 Pasivní balanční obvod

Obvod pro řízení napětí na jednotlivých člancích je zobrazen na Obr. 6.4.



Obr. 6.4: Návrh obvodu pro pasivní balancování.

Jak již bylo popsáno dříve, obvod funguje tak, že přebytečné napětí na článku jednoduše nechá na rezistoru přeměnit na teplo. Funkce obvodu je následující: pokud napětí na konektoru +BAT přesáhne ideální napětí (3,63 V), chceme ho regulovat.

MCU, už v tuto chvíli zná hodnotu napětí z měřících obvodů a ví, že napětí přesáhlo nominální napětí, proto spíná tranzistor N-FET, který přes rezistor $7,5 \Omega$ (R_1 v tomto případě) vybíjí přebytečné napětí.

Pro sepnutí obvodu byl vybrán N-MOSFET tranzistor NVTR4503NT1G od firmy *ON Semiconductor*, jeho maximální napětí U_{DS} je 30V, konstantní proud drainu při běžných podmínkách je 2 A a napětí na gate je typicky 1,75 V tzn., že MCU nebude mít problém tranzistor spínat. Na gate tranzistoru je umístěn rezistor nízké hodnoty, v tomto případě 10Ω , také je zde umístěna diodová ochrana (obě diody typu BT1503 s maximálním závěrným napětím 4 V) proti zvýšenému napětí, co by mohlo poškodit MCU. Kondenzátor za diodami pro ochranu MCU a případné vyhlazení impulsu. Rezistor $300 \text{ k}\Omega$ je zde pro nastavení U_{GS} . Rezistor $7,5 \Omega$ byl navrhnout následujícím způsobem.

Zajímá nás sepnutý stav tranzistoru, protože v tu chvíli potřebujeme přeměnit napětí na teplo. Ve chvíli sepnutí se na rezistor může dostat napětí, které bude přesahovat 3,63 V, ale pouze o malou hodnotu, neboť v tu chvíli už MCU má hodnoty z měřících obvodů. Proud protékající obvodem bude činit (ideálně) 975 mA. Z ohmova zákona [23] pak vychází velikost rezistoru.

$$R_1 = \frac{U_{BATmax}}{I_{nabíjecí}} = \frac{3,63}{0,975} = 3,72\Omega \quad (6.7)$$

Nejbližší vyšší hodnota v řadě rezistorů je $4,7 \Omega$. Avšak pro hodnoty proudu, klesajícího pod 1 A a zároveň s napětím rostoucím k 3,63 V bude vhodné zvolit hodnotu větší, která pokryje i tyto případné výkyvy. Pro rezistor bude tedy zvolena hodnota $7,5 \Omega$. Dále je třeba určit potřebný výkon rezistoru [23].

$$P_{R1} = U_{BAT} \cdot 0,975 = 3,54W. \quad (6.8)$$

Bude proto zvolen rezistor $7,5\Omega/5W$ z řady cementových rezistorů.

Pro indikaci balancování jednotlivých článků je paralelně k rezistoru R_1 připojena LED a rezistor na omezení proudu. LED zelené barvy s maximálním proudem 25 mA. Pro návrh rezistoru byla použita hodnota 20 mA s ohledem na rezervu. Výpočet je následující:

$$R_4 = \frac{U_{BATmax}}{I_D} = \frac{3,63}{0,02} = 181,5\Omega. \quad (6.9)$$

Zvolenou hodnotou je 220Ω , pro určitou rezervu. Tím je návrh pasivního balancování hotov a tyto obvody mohou být zapojeny na každý článek.

6.5 Obvod měření napětí

Vychází z obvodů operačních zesilovačů zapojených jako rozdílových zesilovačů ([25]), jak již bylo uvedeno. V případě všech rezistorů stejné velikosti ($10\text{ k}\Omega$) bude na výstupu operačních zesilovačů přímo rozdíl, který je na jeho vstupech. S ohledem na to, že chceme na výstupu kladné napětí, je zapojení dáno tak, že na neinvertující vstup přivádíme větší napětí. Výhoda zapojení je viditelná z Obr. 5.5, kde je vidět, že jsou obvody vzájemně nezávislé a měří pouze na svém akumulátoru. Obvodové zapojení obsahuje mezi jednotlivými vstupy a také operačními zesilovači blokové kondenzátory pro případné podchycení rušení nebo nežádoucích vlivů. Všechny operační zesilovače jsou integrovány v jednom obvodu typu TL074.

Tyto obvody budou připojeny paralelně ke každému článku celé článkové baterie.

6.6 Pomocné obvody MCU

Napájení MCU (VDD a VDDA) je filtrováno třemi kondenzátory odstupňovanými dle doporučení [26] o ochraně mikrokontrolérů, 10 nF , 100 nF a $1\text{ }\mu\text{F}$. Vstupní vodiče z RN2483 jsou pomocí pullup rezistorů ($10\text{ k}\Omega$) nastaveny do výchozí hodnoty - logické 1. Pin BOOT0, tedy bootovací pin, je uzemněn vzhledem k tomu, že MCU při této hodnotě předpokládá [12], že Flash paměť je zaplněna kódem a tedy ho spustí. Všechny piny, které jsou připojeny z balančních obvodů, jsou ošetřeny sériovým kondenzátorem, nepropustí případný stejnosměrný proud, který by mohl poškodit MCU.

Piny SWDIO a SWCLK, tedy programovací piny, jsou vyvedeny na jumper společně s napájecím napětím a uzemněním obvodu. Zde bude možné naprogramovat MCU pro potřeby obvodu.

Výstupní vodič vedoucí z multiplexoru, který přenáší informaci aktuálně měřené veličiny, musí být filtrován z důvodu zvlnění od napájení. Jelikož napájení tvoří DC/DC měniče, je vysoké riziko, že budou napětí přiváděná do MCU rozkmitaná z důvodu spínání na těchto zdrojích napětí. Pro filtraci byla zvolena aktivní dolní propust druhého řádu typu Sallen-Key. Na operační zesilovač v tomto případě nejsou kladeny nároky z hlediska zesílení do vysokých frekvencí, avšak je třeba aby fungoval při malém napětí a měl nízkou spotřebu, z tohoto důvodu byl zvolen MCP6001T. Ten má rozsah napětí od $1,8\text{ V}$ do $6,0\text{ V}$, typický odebíraný proud činí maximálně $100\text{ }\mu\text{A}$. Pro mezní frekvenci platí následující vzorec [24]

$$f_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}} \quad (6.10)$$

Oba kondenzátory i rezistory budou mít stejné hodnoty pro jednodušší výpočet. Pro rezistory je zvolena hodnota $16\text{ k}\Omega$. Jako mezní kmitočet bude v tomto případě

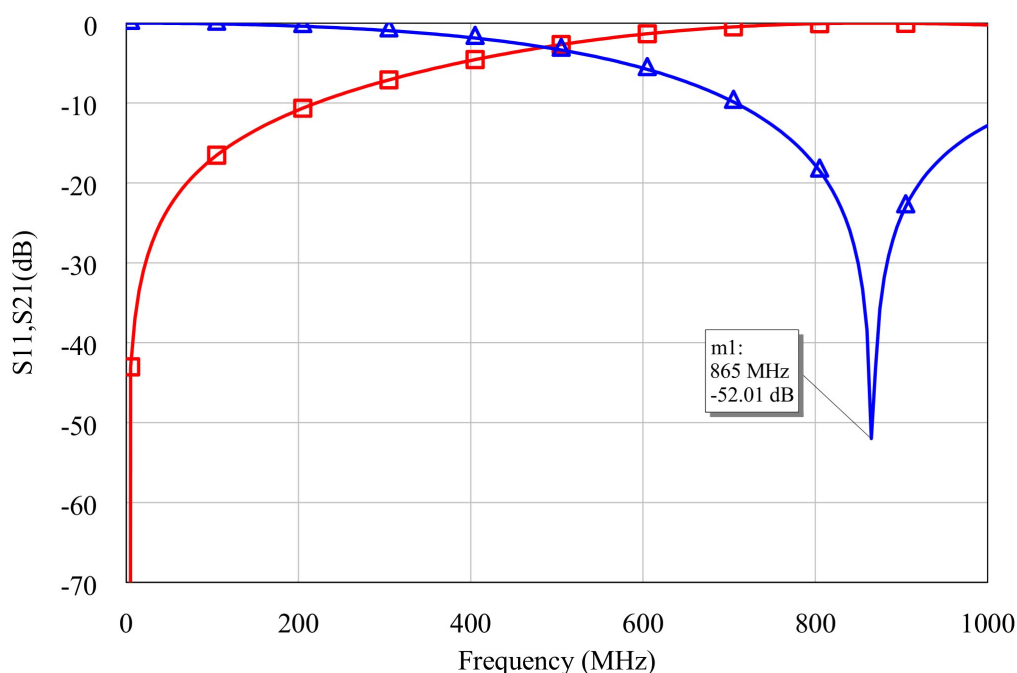
zvoleno 1 Hz. Jelikož jde pouze o stejnosměrné napětí. Po úpravě předchozího vzorce lze vypočítat potřebné kondenzátory.

$$f_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{R^2 \cdot C^2}} \rightarrow C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_C \cdot R_2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 16000} = 9,95 \cdot 10^{-6} F \quad (6.11)$$

Jako hodnota pro oba kondenzátoru bude zvolena nejbližší tabulková hodnota tzn. 10 μF . Tím je návrh filtru pro odrušení nežádoucích signálů z multiplexoru hotov.

6.7 Doplnkové obvody LoRa

Napájecí napětí je stejně jako v případě MCU odfiltrováno třemi kondenzátory. Z pinu RFH je vyveden SMA konektor pro anténu. Pro konektory SMA jsou doporučovány [18] např. ochranné diody (ESD) PGB101. Před SMA je zapojen filtr pásmová propust na 868 MHz. Hodnoty součástek byly získány pomocí návrhového softwaru. Tím byly získány hodnoty $C = 2,2$ pF a $L = 15$ nH. Zároveň byla ověřena i jeho očekávaná charakteristika (Obr. 6.5). Přesnost by vzhledem k ideálnosti simulace měla být dostačující. Jde předně o to, aby se jednalo o kmitočty nad 800 MHz a byla dostatečná vzdálenost od nižších kmitočtů, především 433 MHz (druhý kanál LoRa).



Obr. 6.5: Charakteristika filtru před SMA konektorem, kde modrý průběh odpovídá parametru S_{11} (vstupní činitel odrazu), červený průběh pak parametru S_{21} (zisk).

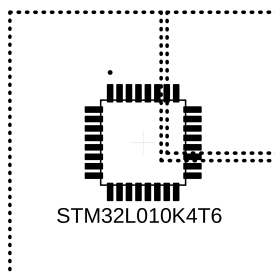
7 Návrh desky

Kompletní návrh schématu i desky plošných spojů byl proveden v návrhovém programu EAGLE v9.5.1. V příloze je celkové schéma solární nabíječky s balančním obvodem podle kterého byl následně sestrojen návrh desky plošných spojů. Solární panel bude připojen připájením kabelů do předvrtaných děr. Výstupní konektor je napájecí souosý konektor typu PC-GK2.1. Akumulátory jsou zasazeny na vrchní straně v patcích, díky tomu by mělo být zařízení více kompaktní. Návrh byl prováděn tak, aby velikost desky byla co možná nejmenší. Výsledné motivy desky jsou obsahem přílohy C.

7.1 Rozdělení zemí

Protože celé zařízení obsahuje integrované obvody pracující ve vyšších frekvencích, je třeba alespoň částečně oddělit druhy zemí, které deska bude obsahovat. Především pak zdroje (step-down měnič a LDO) by mohly zavádět velké zvlnění do MCU nebo jiné digitální části obvodu a zde způsobovat chybu.

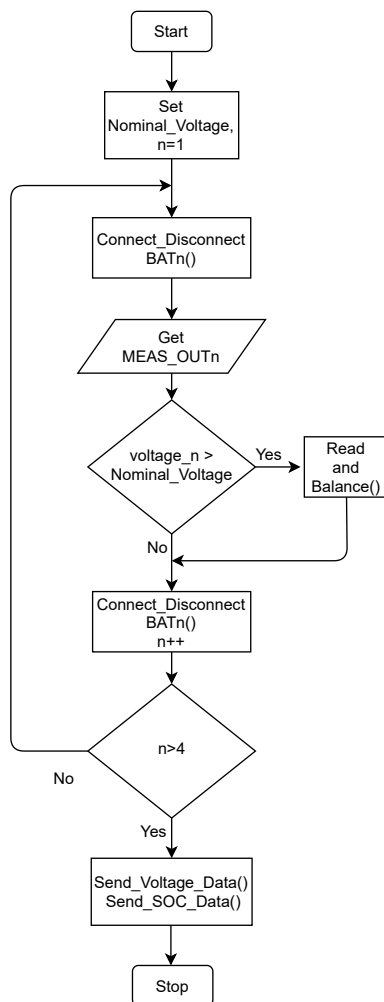
Celá deska bude rozdělena do dvou hlavních zemí PGND (lze jí nazývat výkonová), která je vedena samostatně, a GND. PGND je připojena v okolí solar chargeru. Tyto dvě země budou spojeny v jednu podle [24] přesně pod *Thermal Pad*. GND se pak dále dělí na DGND (digitální zem) a AGND (analogová zem). K DGND spadají MCU, LoRa a také balanční obvody. Na AGND budou připojeny všechny měřící obvody, multiplexor i zdroje napájení. Tyto dvě země budou spojeny přes nulový rezistor a to co nejblíže LDO. Tímto způsobem návrhu co nejvíce eliminujeme případné vysokofrekvenční rušení, které by mohlo pronikat z a nebo do řídicího obvodu, ale také obecně zamezit chybám. V samotném návrhu pak byly vytvořeny dva polygony, které by právě tomuto měli zamezit. Pro výše zmíněné důvodu je toto rozdělení provedeno v místě analogově digitálního převodu MCU (Obr. 7.1).



Obr. 7.1: Demonstrace rozdělení zemí na MCU

8 Výsledky

8.1 Algoritmus pasivního balancování



Obr. 8.1: Algoritmus pro pasivní balancování

Algoritmus byl aplikován na vývojový kit STM32, konkrétně pak STM32 NUCLEO-F303RE. Byl zapojen pomocný obvod, který pomocí děličů s potenciometry simuloval stavy nabití baterií. Referenční hodnota napětí (napětí, které bylo přivedeno na děliče s potenciometry) byla zvolena 4,2 V, což mělo simulovat maximální napětí na jednotlivých člancích. Tato hodnota byla nejprve snížena do rozsahu 3,3 V a to z důvodu, že použitý analogově digitální převodník má maximální možné napětí 3,3 V. Napětí snížené do tohoto rozsahu bylo následně měněno, což simuluje

nabíjení nebo vybíjení článků. Toto napětí bylo přivedeno na vstupy analogového multiplexoru (čtyři vstupy pro každý článek). Poté STM32 postupně měří napětí jednotlivých článků a to tak, že přepíná vstupy na jeden výstup, který je přiveden do interního analogově digitálního převodníku. Pokud dojde k vyhodnocení toho, že článek přesahuje stanovenou referenční hodnotu, spustí se balancování. To bylo simulováno pouze přivedením příslušných (přiřazených k jednotlivým článkům) pinů do stavů vysoké úrovně načež dojde k rozsvícení diod. Tímto jsou výsledky dobře pozorovatelné.

Samotná implementace algoritmu do jazyka C je obsažena v příloze (E.1). Kód nejprve v hlavní smyčce zkontroluje, zda se nevyskytuje chyba (v tomto případě se jedná o příliš velké napětí (zde stanoveno na 4,4 V) na jednotlivých článcích, které by mohlo poškodit jak článek, tak případně celé zařízení). Pokud se chyba vyskytuje dojde postupně k odpojení hlavního vypínače, který se na simulačním obvodu nachází na pinu D8, a následně se ve smyčce 500 ms posílá přes UART chybová zpráva.

V opačném případě dojde nejprve k připojení prvního článku ($x = 1, 2, 3$ a 4) funkci *Connect_Disconnect_BATx* (adresní vstupy multiplexoru nastaveny tak, aby se datový vstup připojil na výstup). Funkce *Read_And_Balance* nejprve převede analogovou hodnotu napětí na digitální (bitové), následně jí přepočte z bitové hodnoty na hodnotu napětí. Přepočet probíhá podle následujícího vzorce (vychází z [28]):

$$V_{BAT} = \frac{AD_BITY \cdot MCU_NAPETI}{AD_ROZLISENI} \cdot \frac{3}{4} \quad (8.1)$$

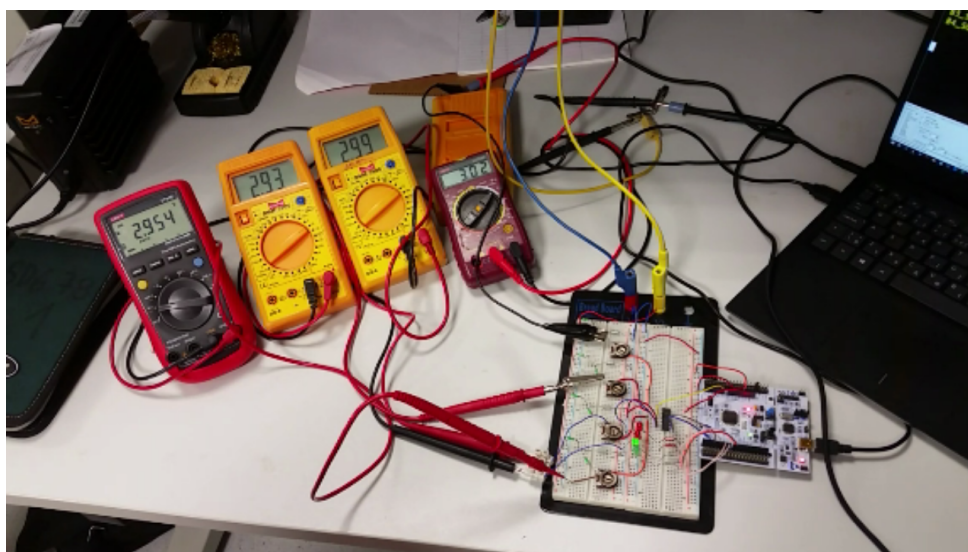
V_{BAT} je hodnota napětí, AD_BITY je přečtený výstup z analogově digitálního převodníku, MCU_NAPETI pak hodnota napětí v MCU (3,3 V), $AD_ROZLISENI$ je zvolené rozlišení analogově digitálního převodníku (až 12 bitový) a zlomek $\frac{3}{4}$ udává přepočet mezi 4,2 V a maximálním rozlišením na 3,3 V (hodnota je zaokrouhlená, protože podíl $\frac{3,3}{4,2} = 0,79$ a to z důvodu aby byl prostor pro odchylku, která byla přibližně změřena na 0,05V).

Poté přijde na řadu funkce *Bal_SWn*, která na základě připojené baterie (a pokud je hodnota napětí vyšší než referenční), přivede do vysoké úrovně pin, který simuluje balancování (zapnutí LED), zde je stanoven čas, po který je LED spuštěná (neboli probíhá balancování). Tento čas by bylo třeba ověřit experimentálně až na skutečném obvodu, protože takto lze těžko odhadovat jakým způsobem by jednotlivé články reagovali. V tomto případě byl stanoven na 2 s pouze z důvodu dobré pozorovatelnosti. Pokud ovšem nedojde ke spuštění balancování nedochází k žádnému čekání a hned po inkrementaci se přejde k další baterii.

Toto se provede ve smyčce na všech bateriích. Po provedení tohoto cyklu dojde ke

spuštění funkcí *Send_voltage_Data* a *Send_SOC_Data*, které zpracují data uložená ve vektorech (takovým způsobem, aby byla data dobře vidět po přijmutí dat do PC). Poté co se jim přiřadí očíslování a také odřádkování jsou data odeslána přes UART.

V případě reálného použití pasivního balancování by kontrola napětí probíhala kontinuálně (neustálý odečet z ADC) a nikdy nedosáhla přímo hodnoty, kdy v tomto případě dochází k balancování. V tomto případě to bylo zvoleno pouze pro účely lepší simulace. Zároveň je také třeba říci, že při reálných článcích by se více využíval spínač pro celou článkovou baterii na ustálení apod.



Obr. 8.2: Zapojení simulačního obvodu

8.2 Simulace

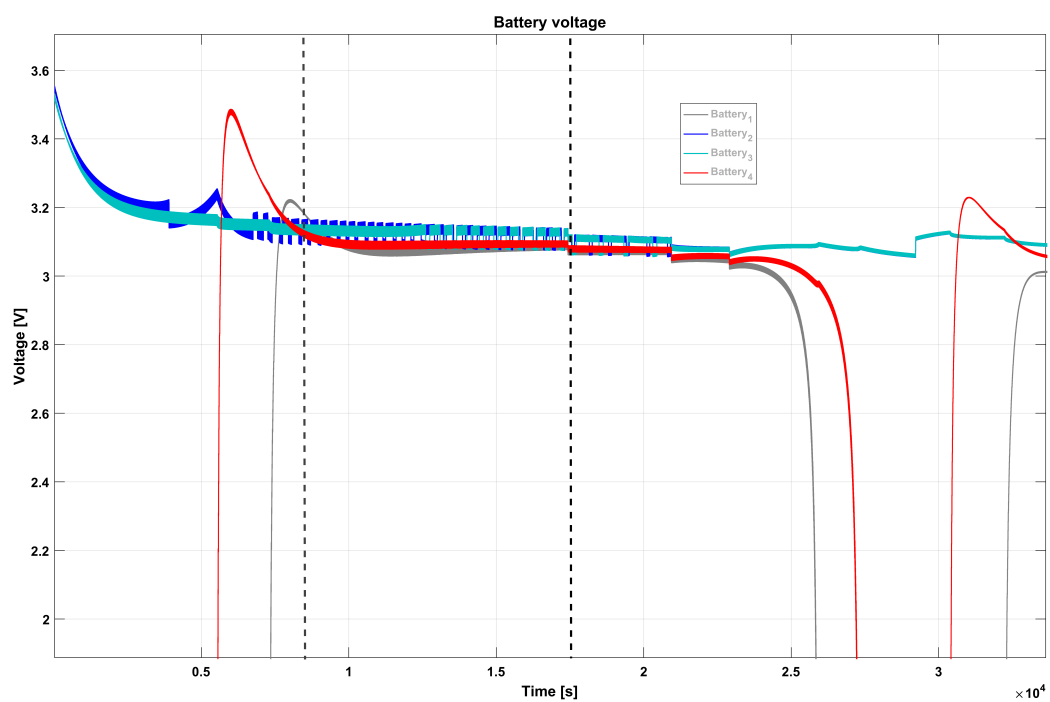
V příloze na Obr. D.1 můžeme vidět simulační obvod pasivního balancování. Počáteční stavy SOC jednotlivých baterií byly: SOC1 = 2 %, SOC2 = 56 %, SOC3 = 18 % a SOC4 = 0 %. Funkci MCU zde zastávají funkce v programu MATLAB, které díky hodnotám napětí na bateriích/článcích (VB_1 - VB_4) mohou spínat MOSFET tranzistory a tím spustit balancování. Za skutečný start simulace lze považovat až časovou hodnotu přibližně $0,85 \cdot 10^4$ s (první čárkovaná čára). Do této doby nastane nastává prudký nárůst SOC všech článků (Obr. 8.4), což by reálně neprobíhalo. Od první čárkované čáry je na Obr. 8.4 vidět, že Baterie 2 již před touto hodnotou dosáhla limitních 90 % SOC (limitní hodnota byla zvolena na 90 % z důvodu dostatečného zobrazení balancování, protože simulace měla při 100% občas problém baterie dál simulovat). Přibližně od $1,25 \cdot 10^4$ s jsou již balancovány

Baterie 2 a 3 (vždy proběhne malý nárůst napětí, který je zaznamenán, spustí se balancování a to způsobuje na Obr. 8.3 postupné pády a nárůsty napětí a na Obr. 8.4 jemný "hřebenatý průběh") a stále můžeme vidět, že Baterie 1 a 4 rostou jak v napětí (Obr. 8.3), tak v SOC (Obr. 8.4). V momentě druhé čárkované čáry je vypnuto nabíjení a nastane pokles napětí na baterii 2 a 3 (na Obr. 8.3 je vidět okamžitý pokles napětí na těchto článcích). Avšak ty ještě podrží baterie 1 a 4 ve stavu nabíjení jak je vidět z jejich SOC na 8.4. Přibližně při hodnotě $2,15 \cdot 10^4$ s nastává klesání SOC všech baterií a s tím i jejich napětí. V momentě $2,5 - 2,6 \cdot 10^4$ s dojde k úplnému vybití článku 1 a 4. Než se stihnou vybit, dojde při přibližně $2,9 \cdot 10^4$ s k opětovnému zapnutí nabíjení a opakuje se stejný proces jako na začátku.

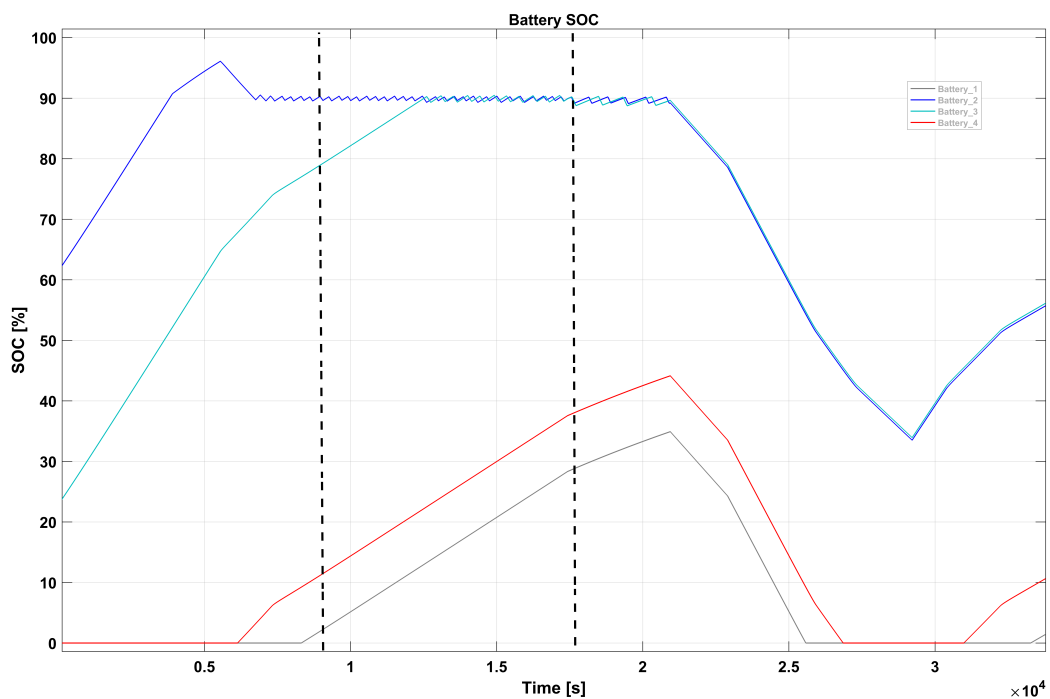
Vzhledem k tomu, že simulace neodráží reálné součástky, je vidět, že poklesy a nárůsty jak napětí tak SOC jsou velmi strmé, k čemuž by reálně nedocházelo. Zde je simulace pouze upravena tak, aby byly vidět zásadní jevy co nejzřetelněji.

Jako aktivní balanční systém byl zvolen přístup z Obr. 3.3a, jehož realizace se nachází v příloze na Obr. D.2. MCU obvodu opět simuluje vytvořen blok funkce MATLAB, která na základě vstupních hodnot napětí vyhodnocuje, které články je třeba balancovat. Funkce je taková, že je vždy nalezen článek s největší a nejmenší hodnotou napětí. Vyhodnotí se, zda jejich rozdíl je větší než stanovená hladina maximálního rozdílu a poté se nejprve připojí k pomocnému kapacitoru (superkapacitoru) článek s maximální hodnotou, částečně se vybije a odpojí se. Hned poté následuje článek s minimální hodnotou, který se připojí a částečně se nabije. Tento proces probíhá neustále dokola, dokud nejsou články vybalancovány. Na Obr 8.5. byla zvolena hodnota jejich maximálního rozdílu 100 mV. V tomto příkladu baterie 3 dobíjí přes pomocný kapacitor baterii 4, která již od začátku nabíjení může být nabíjena strměji. Přibližně okolo hranice 500 s jsou články vybalancovány a vzhledem k jejich ideálnosti již nedochází k dalšímu balancování a pouze se nabíjí. Na Obr. 8.6 byla zvolena minimální hodnota rozdílu maximálního a minimálního napětí na 5 mV. Články se nachází ve stavu, kdy nejsou nabíjeny. Vidíme zde také jev, kdy se mění, které články mají nejmenší hodnoty napětí a tedy se mění, který článek bude nabíjen přes pomocný kapacitor (prolínání se projevuje od 300 s) simulace.

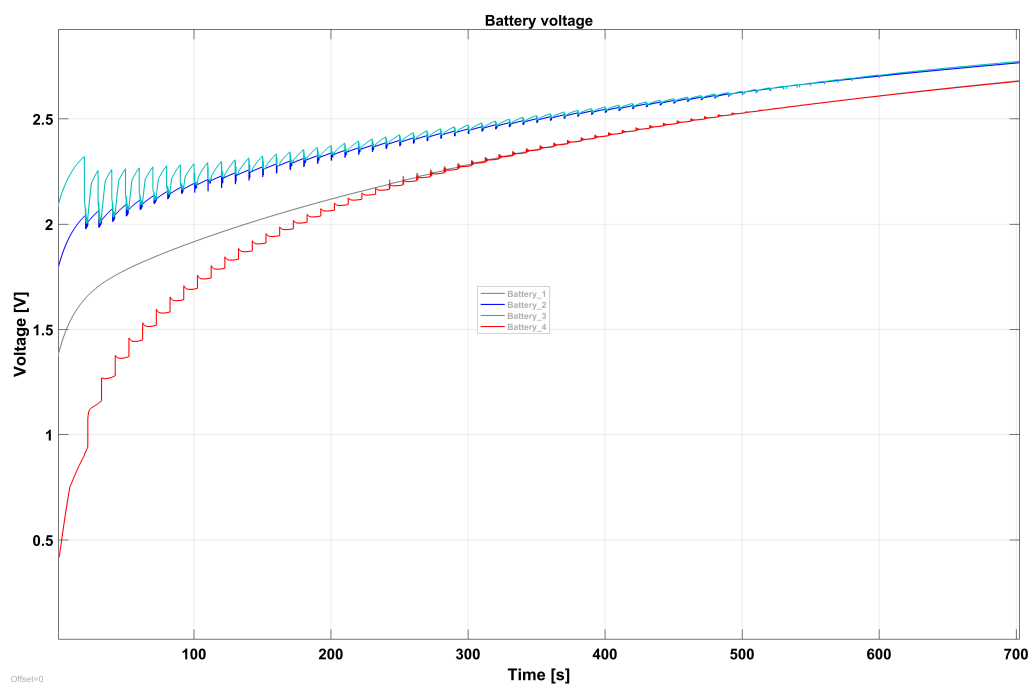
Na předešlých simulacích byly potvrzeny některé již dříve zmíněné jevy z kapitoly Aktivní balancování. Zároveň bylo ukázáno, jak se především liší a jakým způsobem se nakládá s přebytečnou energií. Je třeba znovu podotknout, že simulace byly provedeny v extrémních podmínkách, reálné akumulátory by se nechovali způsobem, jaký je zobrazený např. na Obr. 8.3. Zde dochází k velmi prudkým poklesům i nárůstům napětí (zároveň i SOC) na jednotlivých článcích. Vzhledem ke kapacitě, která byla zvolena by tyto změny trvaly mnohem déle. Zde jde pouze o ukázkou chování a zachycení jevů na relativně krátké simulaci.



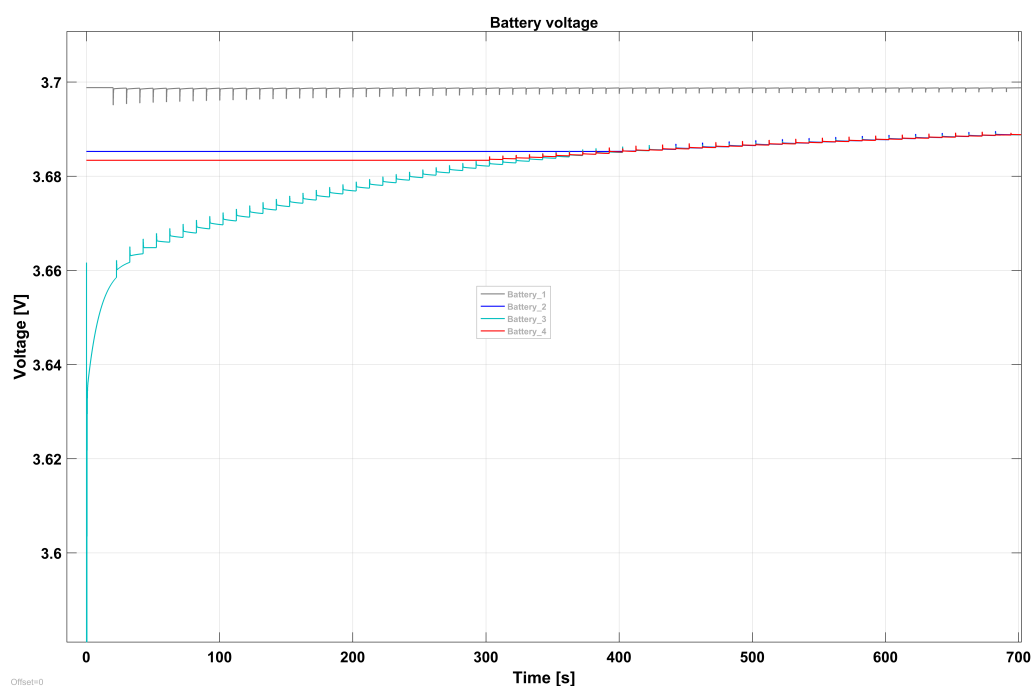
Obr. 8.3: Napětí na bateriích při pasivním balancování.



Obr. 8.4: SOC na bateriích při pasivním balancování.



Obr. 8.5: Napětí na jednotlivých bateriích při aktivním balancování (stav nabíjení).



Obr. 8.6: Napětí na jednotlivých bateriích při aktivním balancování (stav vyrovnávání napětí při vybíjení).

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo nejprve seznámit se s technologií bezdrátového přenosu dat pomocí sítě IoT a ověřit odesílání dat. Dále pak správně zvolit periférie a navrhnout funkční prototyp solární nabíječky integrované baterie s balančním obvodem. Zařízení by mělo být řešeno jako co nejvíce samostatné a zároveň dostatečně kompaktní, aby bylo snadno přenositelné.

Pro napájení zařízení byl vybrán solární panel zvolený spíše na základě přenosné velikosti a je tedy bráno v potaz, že nabíjení může trvat delší dobu. Zařízení se bude starat o baterii tvořenou čtyřmi Li-Ion akumulátory, které vytvoří při nejmenším kapacitu alespoň 12 Ah. Systém, který se bude starat o správu baterií, bude řízen pomocí mikrokontroléru STM32. Ten má na starost vyhodnocovat, kdy je třeba články balancovat, a to pomocí měřících obvodů, které byly proti původnímu plánu přepracovány, aby bylo dosaženo větší přesnosti. Nyní je měření prováděno bez závislosti na ostatních člancích pomocí diferenciálních vstupů na operačních zesilovačích. Řešení je zároveň jednodušší na implementaci, vzhledem k integraci všech zesilovačů v jednom pouzdru. Byl zvolen přístup pasivního balancování, které je jednodušší a vhodnější pro takto malou aplikaci. Pasivní balanční obvody jsou paralelně připojeny k jednotlivým článkům, kde po sepnutí budou přebytečnou energii přeměňovat na teplo. Změřená data mohou být odeslána do IoT pomocí LoRa, o což se bude starat STM32 ve zvolených časových úsecích.

Vzhledem k průběžné změně zadání došlo k simulování toho, jak by měl balanční obvod pracovat ve skutečnosti a stejně tak došlo k implementaci kódu do vývojového kitu STM32. Algoritmus balancování a stejně tak kód se nachází v příloze této práce. Ačkoliv je algoritmus použit pouze ve vývojovém kitu, byly mu přiřazeny periférie, které simulují chování článků a tedy bylo možno vyzkoušet balanční algoritmus alespoň tímto způsobem. Data z měření náhrad článků jsou poté odesílána pomocí UART, což simuluje naši IoT síť.

Výsledkem podrobného návrhu je deska plošných spojů, která před výslednou verzí prošla několika zásadními změnami a byla podchycena spousta chyb. Je tedy pravděpodobné, že by měla být po výrobě a osazení funkční. Zároveň také bylo dosaženo téměř 50% snížení plochy oproti původní desce. Balanční algoritmus je po testování připraven na implementaci do osazeného hardwaru.

Lze říci, že byly splněny body zadání a zařízení je navrženo kompaktní, může fungovat samostatně a sdělovat data o svých balančních procesech.

Literatura

- [1] PATEL, Mukund R. [cit. 2019-11-30]. *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation*, 2nd ed. Boca Raton, FL, c2006. ISBN 08-493-1570-0.
- [2] KHATIBI, Ali, Fatemeh RAZI ASTARAEI a Mohammad Hossein AHMADI. *Generation and combination of the solar cells: A current model review*. [online]. 2019, 7(2), 305-322 [cit. 2019-12-09]. DOI: 10.1002/ese3.292. ISSN 2050-0505. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ese3.292>.
- [3] CENEK, Miroslav. *Akumulátory od principu k praxi*. [cit. 2019-11-30]. Praha: FCC Public, 2003. ISBN 978-808-6534-039.
- [4] DENG, D. *Li-ion batteries: basics, progress, and challenges*. [online]. 2015, 3(5) [cit. 2019-11-30]. ISSN 20500505. Dostupné z URL: <http://doi.wiley.com/10.1002/ese3.95>.
- [5] Types of Lithium-ion [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z URL: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion.
- [6] Waaree Energies Ltd. [online katalogový list]. *SURYA SERIES, WS-3 to WS-37*. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z URL: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.522-094.1.pdf>.
- [7] LG Chem Ltd. [online katalogový list]. *INR18650 F1L*. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z URL: <https://www.tme.eu/Document/e1a8dc537fef25f98a0a4a2008563652/ACCU-INR18650-3.35.pdf>.
- [8] LG Chem Ltd. [online]. *LGC INR18650 F1L*. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z URL: https://vanderworp.org/wp-content/uploads/2019/06/LG_INR18650F1L_TI.pdf.
- [9] Texas Instruments Inc. [online katalogový list]. *BQ24650*. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z URL: <https://www.overleaf.com/project/5dc131dcc09d92000110bd9d> <http://www.ti.com/lit/ds/slusa75a/slusa75a.pdf>.
- [10] Texas Instruments Inc. [online katalogový list]. *LM2596 SIMPLE SWITCHER*. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>.

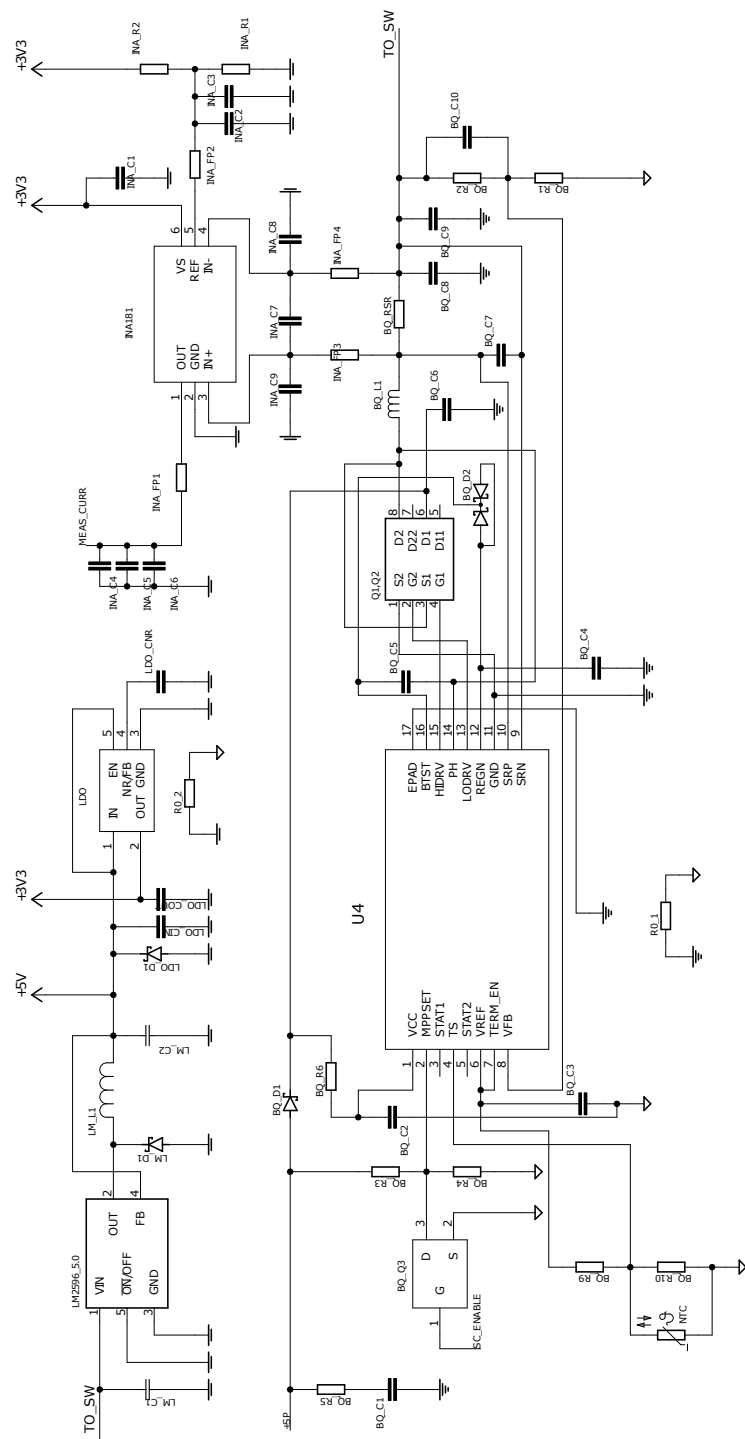
- [11] Texas Instruments Inc. [online katalogový list]. *TPS737xx*. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z URL:
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps737.pdf>>.
- [12] STMicroelectronics. [online katalogový list]. *STM32L010F4*. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z URL:
<<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l010f4.pdf>>.
- [13] WAI CHUNG Lee, DRUDY David, MELLOR Phil. *Comparison of passive cell balancing and active cell balancing for automotive batteries*. [online]. 2011 [cit. 2020-04-23]. Online ISBN: 978-1-61284-246-2. Dostupné z URL:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/6043108/authors>>.
- [14] ANDREA, Davide. *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*. [cit. 2019-11-30]. ARTECH HOUSE, 2010. MA 02062: ARTECH HOUSE, 2010. ISBN 978-1-60807-104-3.
- [15] Texas Instruments Inc. [online katalogový list]. *INAx181*. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z URL:
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina181.pdf>>.
- [16] Texas Instruments Inc. [online katalogový list]. *LM9061*. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z URL:
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm9061-q1.pdf>>.
- [17] Nexperia B.V. [online katalogový list]. *74HC4051D,652*. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z URL:
<https://cz.mouser.com/datasheet/2/916/74HC_HCT4051-1389023.pdf>.
- [18] Microchip Technology Inc. [online katalogový list]. *RN2483*. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z URL:
<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/50002346c.pdf>>.
- [19] HANES David, Gonzalo SALGUEIRO, Patrick GROSSETETE, Robert BARTON a Jerome HENRY. *IoT fundamentals: networking technologies, protocols, and use cases for the Internet of things*. Indianapolis, Indiana, USA: Cisco Press, [2017]. Cisco Press fundamentals series. ISBN 978-1-58714-456-1. [cit. 2020-04-23].
- [20] All About LoRa and LoRaWAN [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z URL:
<<https://www.sghosly.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>>.

- [21] LoRaWAN simply explained [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z URL: <http://jensd.be/755/network/lorawan-simply-explained>.
- [22] LG Chem Ltd. [online]. *LGC INR18650 F1L*. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z URL: <https://rf-tools.com/lc-filter/>.
- [23] BRANČÍK, L. [cit. 2019-11-30]. Elektrotechnika 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2004. s. 1 (s). ISBN: 80-214-2607- 1.
- [24] SEDLÁČEK, J. [cit. 2019-11-30]. Elektrotechnika 2. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. s. 1 (s). ISBN: 80-214-2319- 6.
- [25] BRANČÍK, L.; DOSTÁL, T. [cit. 2020-04-23]. Analogové elektronické obvody. REL0715. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007. s. 1-193 ISBN: 978-80-214-3525- 4.
- [26] VRBA, K. [cit. 2020-04-23]. Konstrukce elektronických zařízení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. s. 1-251. ISBN: 978-80-214-4719-6. (cs)
- [27] VRBA, K., HANÁK, P. [cit. 2020-04-23]. Vybrané problémy konstrukce elektronických přístrojů pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO (cs)
- [28] PREMEAUX Emery, EVANS Brian.. *Arduino Projects to Save the World*. Apress; 1st ed. edition [2011]. ISBN 978-1-4302-3624-5. [cit. 2020-04-23].

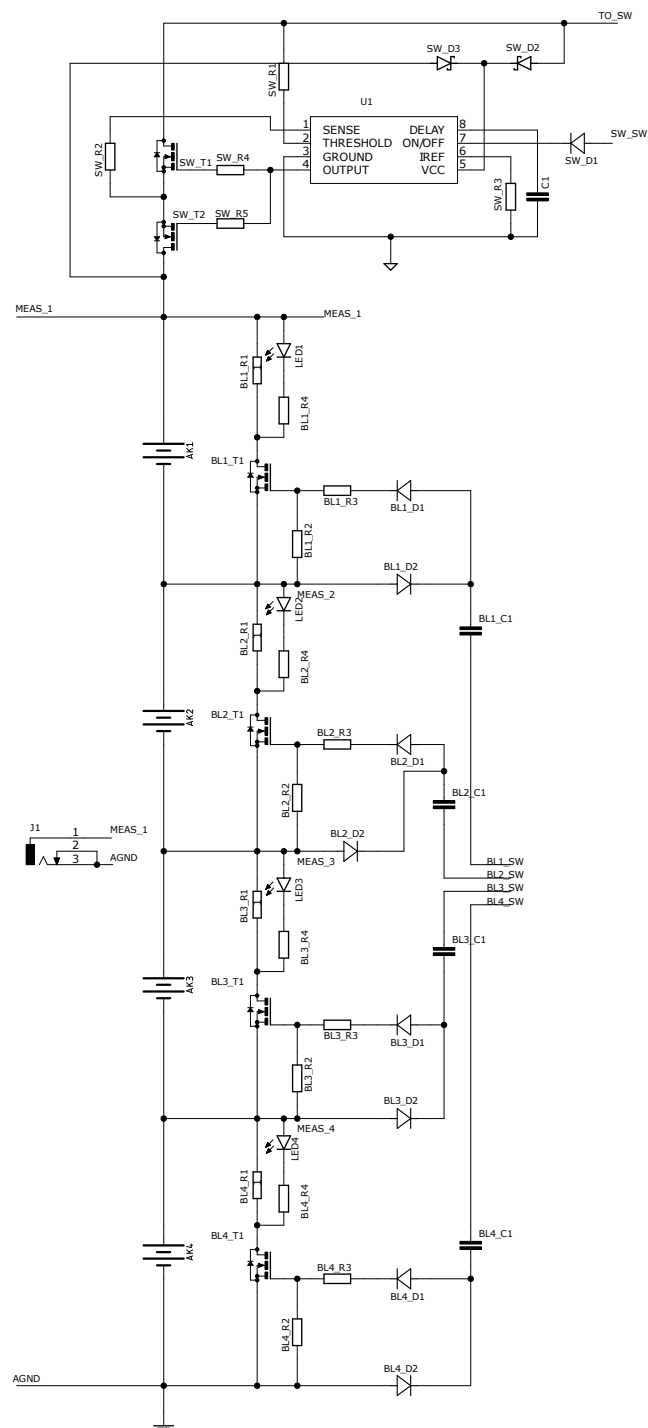
Seznam příloh

A Schéma zapojení	59
B Motivy desek plošného spoje	63
C Seznam součástek	65
D Zapojení simulačních obvodů	67
E Zdrojový kód	69

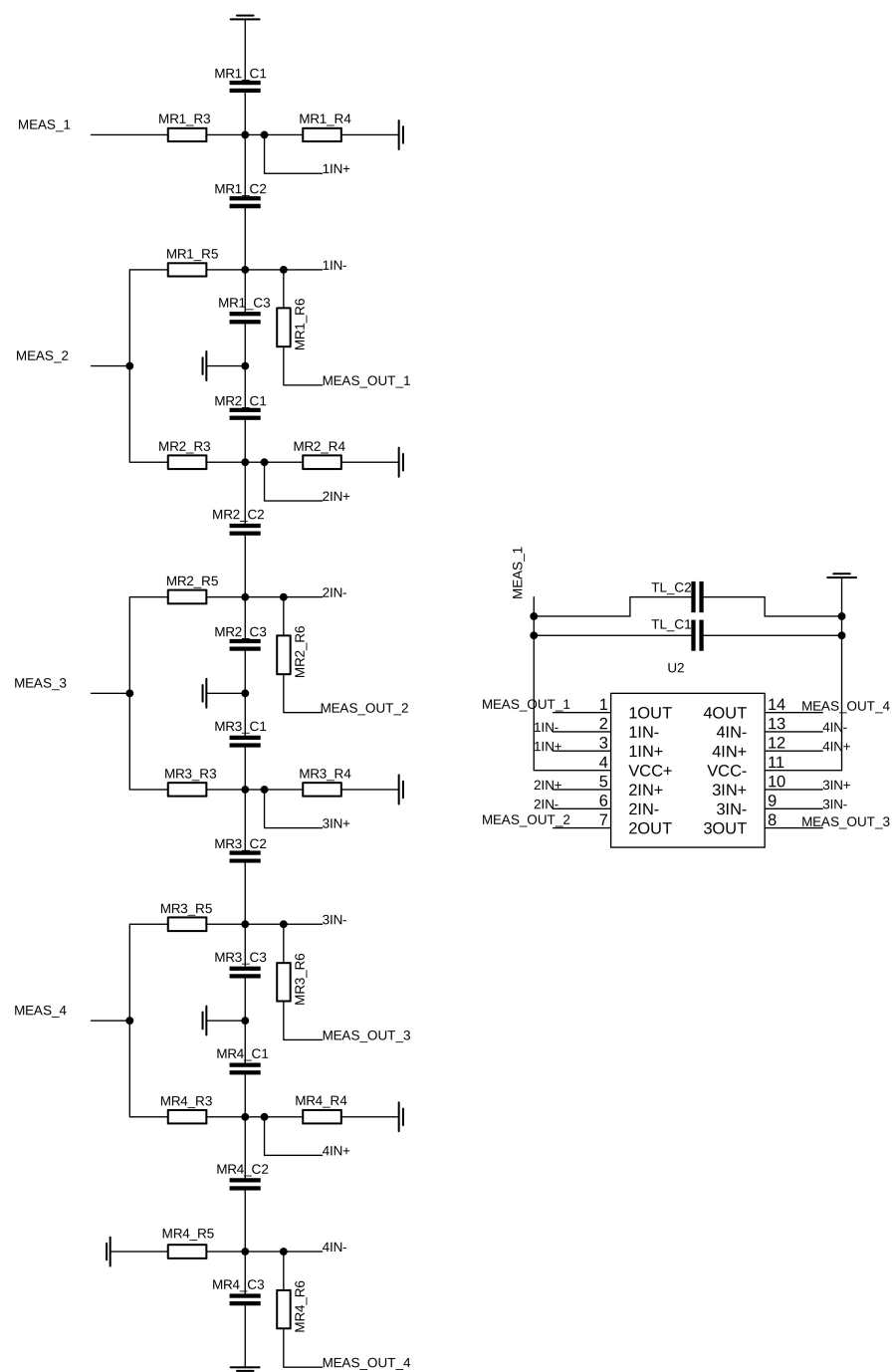
A Schéma zapojení



Obr. A.1: Solar charger, zdroje napětí, měření proudu.

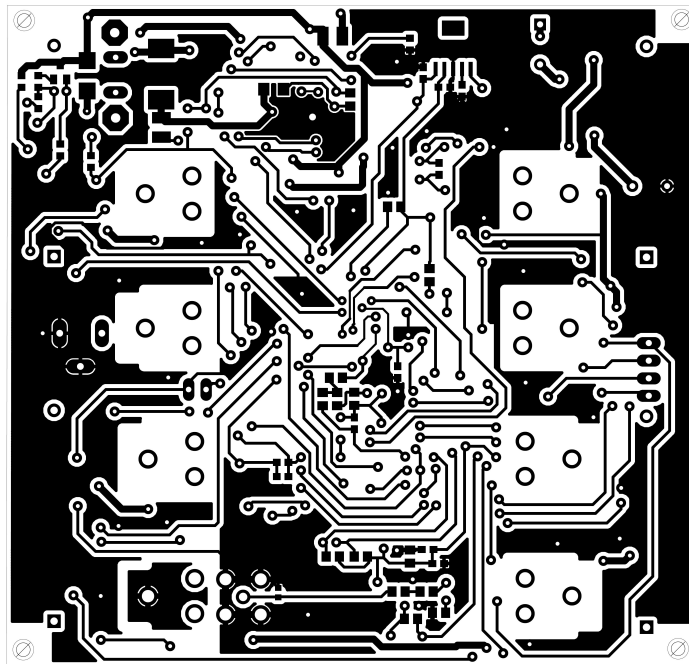


Obr. A.2: Balanční obvody, spínač.

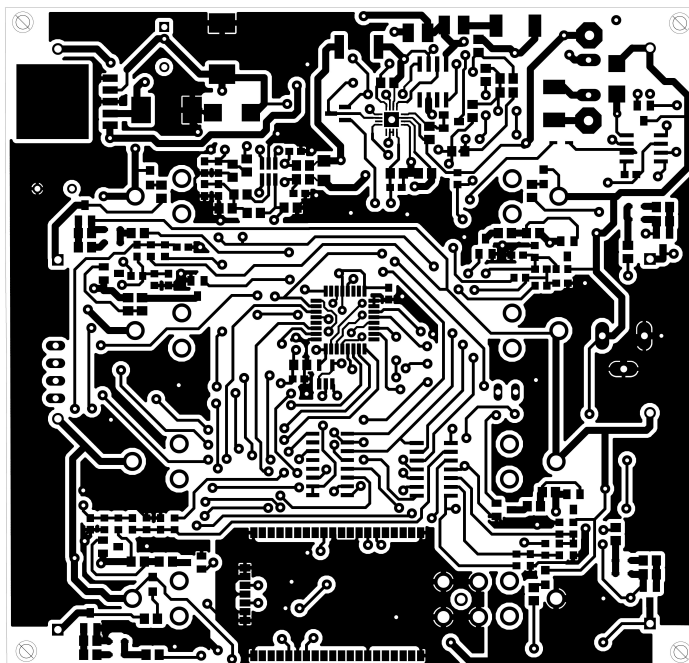


Obr. A.4: Měřicí obvody.

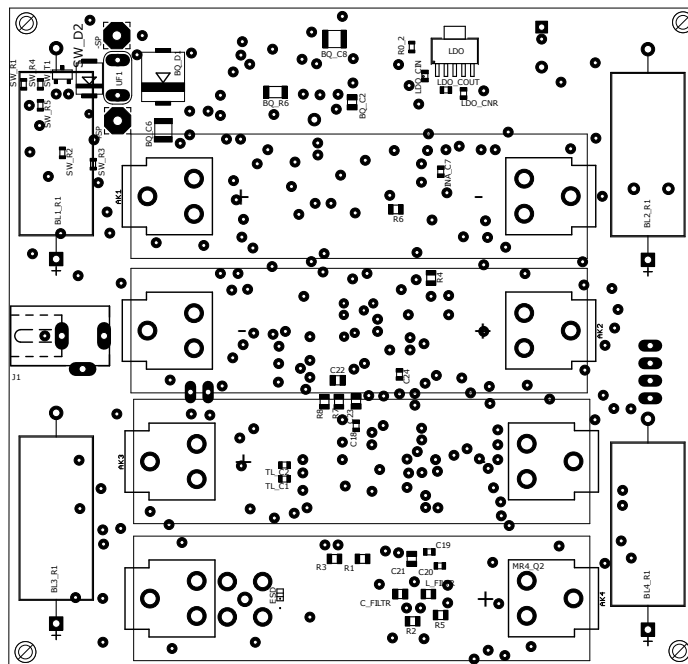
B Motivy desek plošného spoje



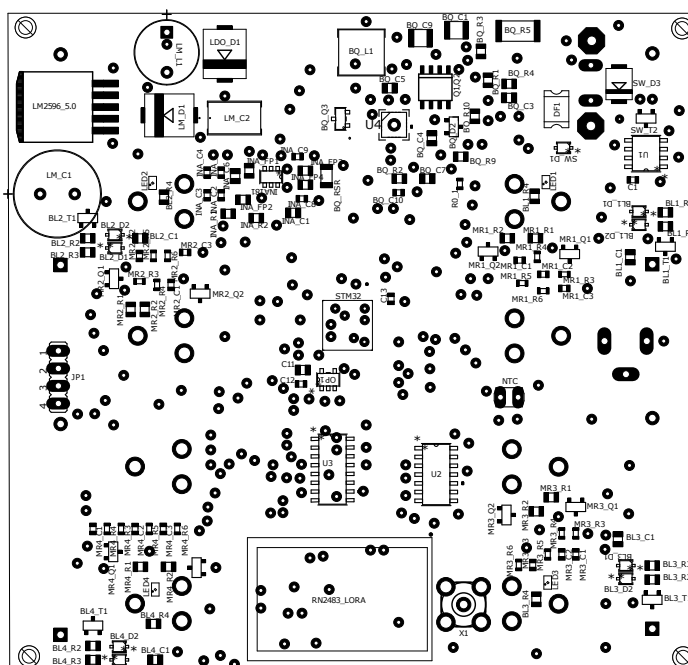
Obr. B.1: Motiv desky - horní strana.



Obr. B.2: Motiv desky - spodní strana.



Obr. B.3: Osazení desky - horní strana.



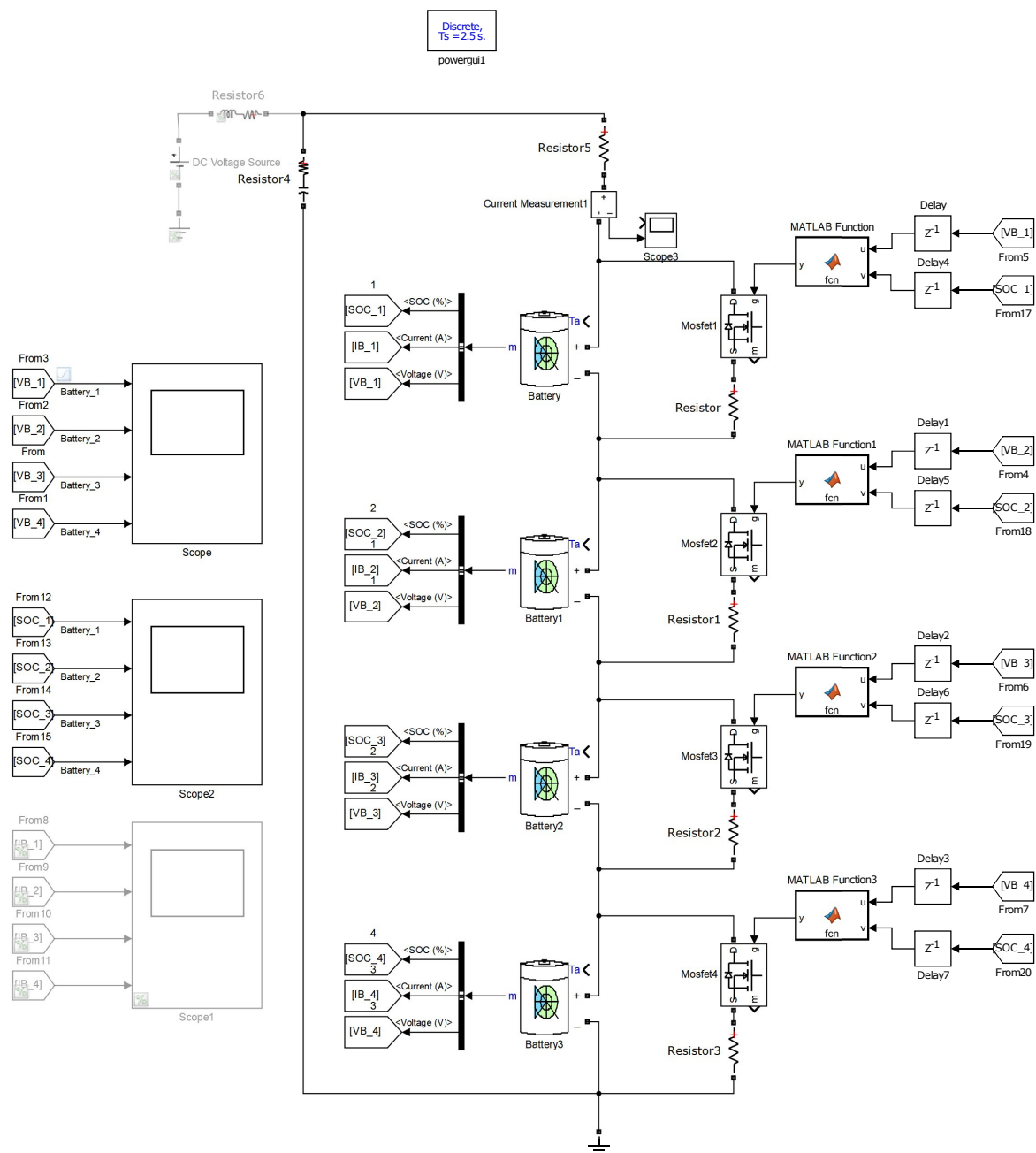
Obr. B.4: Osazení desky - spodní strana.

C Seznam součástek

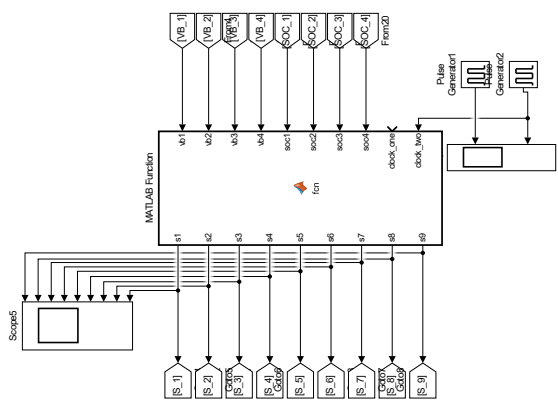
Qty	Part	Value	Device	Package
1	BQ_C7	0,1u/25V	C-EUC0805	C0805
1	R0_1, R0_2	0R	R-EU_R0603	R0603
1	BQ_R6	10/0,25W	R-EU_R1206	R1206
4	MR1_R1, MR1_R2, MR1_R3, MR1_R4	100k	R-EU_R0805	R0805
4	BL1_C1, BL2_C2, BL3_C1, BL4_C1	100n/10V	C-EUC0805	C0805
9	C12, C18, C20, C24, INA_C1, INA_C3, INA_C5, INA_C8, INA_C9	100n/10V	C-EUC0603	C0603
1	LDO_CIN	100n/16V	C-EUC0603	C0603
10	BQ_C5, C1, MR1_C1, MR1_C3, MR2_C1, MR2_C3, MR3_C1, MR3_C3, MR4_C1, MR4_C3, TL_C2	100n/25V	C-EUC0603	C0603
1	SW_R2	100R	R-EU_R0603	R0603
1	LM_L1	100u	RLB0914-181KL	IND_BOURNS_RLB0914
1	LM_C2	100u/10V	293D107X9010D	CAP_293D_D-M
16	MR1_R3, MR1_R4, MR1_R5, MR1_R6, MR2_R3, MR2_R4, MR2_R5, MR2_R6, MR3_R3, MR3_R4, MR3_R5, MR3_R6, MR4_R3, MR4_R4, MR4_R5, MR4_R6	10k	R-EU_R0603	R0603
5	R1, R2, R3, R4, R6	10k	R-EU_R0805	R0805
1	LDO_CNR	10n/10V	C-EUC0603	C0603
4	BL1_R3, BL2_R3, BL3_R3, BL4_R3	10R	R-EU_R0805	R0805
2	SW_R4, SW_R5	10R	R-EU_R0603	R0603
7	C11, C21, C22, C23, INA_C2, INA_C6, INA_C7	10u/10V	C-EUC0805	C0805
2	BQ_C6, BQ_C8	10u/25V	C-EUC1210	C1210
5	MR1_C2, MR2_C2, MR3_C2, MR4_C2, TL_C1	10u/25V	C-EUC0603	C0603
1	SW_R3	15k4	R-EU_R0603	R0603
1	L_FILTR	15n	R-EU_R0805	R0805
2	R7, R8	16k	R-EU_R0805	R0805
2	INA_R1, INA_R2	1k_1p	R-EU_R0805	R0805
4	C13, C19, INA_C4, LDO_COUT	1u/10V	C-EUC0603	C0603
3	BQ_C2, BQ_C3, BQ_C4	1u/25V	C-EUC0805	C0805
1	BQ_C1	2,2u/25V	C-EUC1210	C1210
1	BQ_R5	2/1W	R-EU_R2512	R2512
4	INA_FP1, INA_FP2, INA_FP3, INA_FP4	20m	R-EU_R0805	R0805
5	BL1_R4, BL2_R4, BL3_R4, BL4_R4, SW_R1	220R	R-EU_R0603	R0603
1	BQ_C10	22p/25V	C-EUC0603	C0603
1	BQ_Q3	2N7002ET1GSOT-23-M	2N7002ET1GSOT-23-M	SOT-23-M
1	C_FILTR	2p2	C-EUC0805	C0805
1	BQ_R10	30,1k/1p	R-EU_R0805	R0805
4	BL1_R2, BL2_R2, BL3_R2, BL4_R2	300k	R-EU_R0805	R0805
4	MR1_R2, MR2_R2, MR3_R2, MR4_R2	30k	R-EU_R0805	R0805
1	BQ_RSR	36m	R-EU_R1206	R1206
2	LDO_D1, LM_D1	3A/20V	SCHOTTKY-DIODESMC	SMC

1	BQ_C9	4,7u/25V	C-EUC1210	C1210
1	BQ_R2	470k/0,5p	R-EU_R0805	R0805
1	BQ_R4	47k/0,5p	R-EU_R0805	R0805
1	BQ_R9	5,23k/1p	R-EU_R0805	R0805
1	R5	50R	R-EU_R0805	R0805
1	BQ_R3	620k/0,5p	R-EU_R0805	R0805
1	LM_C1	680u/35V	UPM1V681MHD	CAP_UHD_12P5X25
1	BQ_R1	68k/0,5p	R-EU_R0805	R0805
1	U3	74HC4051D,652	74HC4051D,652	SOT109-1
4	BL1_R1, BL2_R1, BL3_R1, BL4_R1	7R5/5W	SQP500JB-120R	YAG_SQP500
1	BQ_D2	BAT54C	BAT54C	SOT23
4	AK1, AK2, AK3, AK4	BATTERY-LI-INR18650	BATTERY-18650	BATTERY_18650-HOLDER
1	U4	BQ24650RVAT	BQ24650RVAT	RVA16_2P14X2P14
4	MR1_Q2, MR2_Q2, MR3_Q2, MR4_Q2	BSH103.215	BSS123	SOT23
9	BL1_D1, BL1_D2, BL2_D1, BL2_D2, BL3_D1, BL3_D2, BL4_D1, BL4_D2, SW_D1	BT1503	BZT52C3V6S-7-F	SOD323
1	X1	BU-SMA-V	BU-SMA-V	SOD331
1	Q1,Q2	FDS6912A	RF600E-SO	SOD332
1	DF1	FSF 1A SMD	MF-SMDF050	SOD333
4	LED_01, LED_02, LED_03, LED_04	green	LEDSML0805	SOD334
1	INA181	INA181A1IDBVTDBV6-M	INA181A1IDBVTDBV6-M	SOD338
4	MR1_Q1, MR2_Q1, MR3_Q1, MR4_Q1	IRLML6302TRPBF	BSS84	SOD339
1	LM2596_5.0	LM2596S	LM2596S	SOD343
1	U1	LM9061MX/NOPB	LM9061MX/NOPB	SOD344
2	SW_D2, SW_D3	MBRS140T3	SCHOTTKY-DIODESMD	SOD345
1	OP1	MCP6001T-I/OTSOT-23-5	MCP6001T-I	SOD347
1	BQ_L1	MPX1D0630L150	B82477G4105M000	SOD348
6	BL1_T1, BL2_T1, BL3_T1, BL4_T1, SW_T1, SW_T2	NVTR4503NT1G	BSS123	SOD349
1	J1	PC-GK2.1	DCJ0303	SOD355
1	ESD	PGB1010603MR	PGB1010603MR	SOD356
1	UF1	PTC PTC30V4.6	19560	SOD357
1	RN2483_LORA	RN2483-I/RM095	RN2483-I/RM095	SOD358
1	BQ_D1	SK54C	SCHOTTKY-DIODESMC	SOD359
1	STM32	STM32L010K4T6	STM32L010K4T6	SOD360
1	U2	TL074IDR	TL074IDR	SOD361
1	LDO	TPS73733DCQR	TPS73733DCQR	SOD362

D Zapojení simulačních obvodů



Obr. D.1: Obvod pro simulaci pasivního balancování.



68

E Zdrojový kód

Výpis E.1: Nejdůležitější části požadovaného algoritmu - implementovaný do jazyka C.

```
#include "main.h"
#include <stdio.h>
#include <math.h>

ADC_HandleTypeDef hadc1;
UART_HandleTypeDef huart2;
void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_USART2_UART_Init(void);
static void MX_ADC1_Init(void);

int n=1; //n uchovava hodnotu, na ktere baterii se nachazime
float voltage[4]; //Vektor hodnot napeti
uint32_t adcVal[4]; //Vektor hodnot napeti v bitove podobě

int main(void)
{
    HAL_Init(); //Inicializace ovladani periferii
    SystemClock_Config(); //Inicializace interniho casovace
    MX_GPIO_Init(); //Inicializace vst. a vys. pinu
    MX_USART2_UART_Init(); //Inicializace UART
    MX_ADC1_Init(); //Inicializace AD prevodniku
    while (1)
    {
        if(err=1) //Pokud se vyskytuje problem
        {Err_Message(); //Smycka vystrazne zpravy}
        else //Nevyskytuje se problem
        {
            if (n==1) //BAT1 -> MUX_IN(A4) - S2=1, S1=0, S0=0
            {
                Connect_Disconnect_BAT1(); //Pripojeni BAT1
                Read_And_Balance(); //Vyhodnoceni hodnoty a zapnuti
                //balancovani (pri potrebe), jinak pokračuje na dalsi
                Connect_Disconnect_BAT1(); //Odpojeni BAT1
            }
            else if(n==2) //BAT2 -> MUX_IN(A6) - S2=1, S1=1, S0=0
            {
```

Connect_Disconnect_BAT2();	38
Read_And_Balance();	39
Connect_Disconnect_BAT2();	40
}	41
<u>else if</u> (n==3) <i>//BAT3 -> MUX_IN(A7) - S2=1, S1=1, S0=1</i>	42
{	43
Connect_Disconnect_BAT3();	44
Read_And_Balance();	45
Connect_Disconnect_BAT3();	46
}	47
<u>else if</u> (n==4) <i>//BAT4 -> MUX_IN(A5) - S2=1, S1=0, S0=1</i>	48
{	49
Connect_Disconnect_BAT4();	50
Read_And_Balance();	51
Connect_Disconnect_BAT4();	52
}	53
<u>else</u>	54
{	55
n=1;	56
Send_Voltage_Data(); <i>//Odeslani dat napeti a SOC</i>	57
Send_SOC_Data(); <i>//pres UART na konci cyklu</i>	58
}	59
}	60
}	61
}	62
<u>void</u> Read_And_Balance()	63
{	64
HAL_ADC_Start(&hadc1); <i>//Zacina prevod AD</i>	65
<u>if</u> (HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 50) == HAL_OK)	66
{ <i>//Pokud probehl prevod v pruhebu 50 ms v poradku,</i>	67
<i>//lze pokracovat dale v algoritmu</i>	68
adcVal[n-1] = HAL_ADC_GetValue(&hadc1);	69
voltage[n-1]=(((adcVal[n-1]*3.3)/4095)/0.75);	70
<i>//V=(((ADC_Bits*MCU_V)/ADC_resolution)/Correction_V_Ratio)</i>	71
<u>if</u> (Terminate(voltage[n-1])==1){ <u>return</u> ;}	72
<u>else</u> {	73
<u>if</u> (voltage[n-1] >= 3.6) <i>//Podminka zapnuti balancovani</i>	74
{	75
Bal_SWn(); <i>//Turn on balancing, pockat a vypnout</i>	76
n++; <i>//Inkrementace = pokracovani na dalsi baterii</i>	77
}	78

```

    else{n++;}
}
}
}
void Connect_Disconnect_BAT1(void) //BAT1 -> A4
{
    //S2=1, S1=0, S0=0
    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA,GPIO_PIN_10); //S2 = 1
}
void Connect_Disconnect_BAT2(void) //BAT2 -> A6
{
    //S2=1, S1=1, S0=0
    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA,GPIO_PIN_10); //S2 = 1
    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOB,GPIO_PIN_3); //S1 = 1
}
void Connect_Disconnect_BAT3(void) //BAT3 -> A7
{
    //S2=1, S1=1, S0=1
    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA,GPIO_PIN_10); //S2 = 1
    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOB,GPIO_PIN_3); //S1 = 1
    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOB,GPIO_PIN_5); //S0 = 1
}
void Connect_Disconnect_BAT4(void) //BAT4 -> A5
{
    //S2=1, S1=0, S0=1
    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA,GPIO_PIN_10); //S2 = 1
    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOB,GPIO_PIN_5); //S0 = 1
}

void Bal_SWn(void)
{
    int Time = 2000; //Cas je zvolen pouze pro dobre zobrazeni
    if(n==1)
    {
        HAL_GPIO_TogglePin(GPIOB,GPIO_PIN_10); //SW1=LED1
        HAL_Delay(Time); //Probiha balancovani
        HAL_GPIO_TogglePin(GPIOB,GPIO_PIN_10); //SW1=LED1
    }
    else if(n==2)
    {
        HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA,GPIO_PIN_8); //SW2=LED2
        HAL_Delay(Time);
        HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA,GPIO_PIN_8); //SW2=LED2
    }
    else if(n==3)

```

```

{
    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA,GPIO_PIN_9); //SW3=LED3
    HAL_Delay(Time);
    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA,GPIO_PIN_9); //SW3=LED3
}
else
{
    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOC,GPIO_PIN_7); //SW4=LED4
    HAL_Delay(Time);
    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOC,GPIO_PIN_7); //SW4=LED4
}
}
}
void Send_Voltage_Data(void)
{
    uint8_t B1V_txt[12] = " B1Voltage  ",
    B2V_txt[12] = " B2Voltage  ",
    B3V_txt[12] = " B3Voltage  ",
    B4V_txt[12] = " B4Voltage  ";
    char charVoltage_1[7] = "0000000"; //Deklarace pripravenych
    char charVoltage_2[7] = "0000000"; //promennych
    char charVoltage_3[7] = "0000000";
    char charVoltage_4[9] = "000000000";
    sprintf(charVoltage_1, "%.2f\r\n",voltage[0]);
    //Dojde ke slozeni vybraneho textu a aktualniho napeti,
    //ktore je zaokrouhleno na 2 desetinna mista
    HAL_UART_Transmit(&huart2, B1V_txt, 12, 10);
    //Odeslani oznaceni napeti
    HAL_UART_Transmit(&huart2,(uint8_t *) charVoltage_1, 7, 10);
    //Odeslani napeti, ktore je prevedeno do unsigned int

    sprintf(charVoltage_2, "%.2f\r\n",voltage[1]);
    HAL_UART_Transmit(&huart2, B2V_txt, 12, 10);
    HAL_UART_Transmit(&huart2,(uint8_t *) charVoltage_2, 7, 10);

    sprintf(charVoltage_3, "%.2f\r\n",voltage[2]);
    HAL_UART_Transmit(&huart2, B3V_txt, 12, 10);
    HAL_UART_Transmit(&huart2,(uint8_t *) charVoltage_3, 7, 10);

    sprintf(charVoltage_4, "%.2f\r\n\r\n",voltage[3]);
    HAL_UART_Transmit(&huart2, B4V_txt, 12, 10);
    HAL_UART_Transmit(&huart2,(uint8_t *) charVoltage_4, 9, 10);

```

